

Petra Hanhijoki

AALTOVOIMA ENERGiantuotanto- MUOTONA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kalevi Huhtala
Yrjö Majanne
Helmikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Petra Hanhijoki: Aaltovoima energiantuotantomuotona
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikka
Helmikuu 2020

Tässä työssä pohditaan, mitä vaaditaan, että aaltovoima olisi energiantuotantomuotona kilpailukykyinen teollisuuden mittakaavassa. Työ on kirjallisuustutkimus, jossa pyritään käyttämään monipuolisesti eri lähteitä. Ensiksi perehdytään aaltovoimaan energiantuotantomuotona, jonka jälkeen sen kilpailukykyä tarkastellaan skaalautuvuuden, tasoitettujen kustannusten, teknologian sekä ympäristövaikutusten avulla. Kunkin kategorian tuloksia verrataan kahteen muuhun ympäristöystävälliseen energiantuotantomuotoon – aurinko- ja tuulivoimaan.

Teollisessa mittakaavassa aaltovoiman voidaan katsoa alkaneen 1970-luvulla öljykriisin seurauksena. Aaltovoima valjastaa aalloissa olevan liike- tai potentiaalienergian sähköksi. Aaltovomajärjestelmä voidaan toteuttaa oskilloivan vesipatsas, aktiivisen aaltorungon ja ylitysmenetelmän avulla.

Aaltovoima skaalautuvuus ei riitä kattamaan koko maailman energiankulutusta. Se pystyisi kuitenkin teoriassa tuottamaan noin miljardin kotitalouden sähkönkulutuksen. Aaltovoimasta aiheutuvat tasoitettut kustannukset ovat vertailukelpoiset, vaikkakin tämän hetkiseen Suomen sähkön hintaan nähden 0,40€ suuremmat per päivä. Ilmastohyöty on kavihuonepäästöjen näkökulmasta merkittävä, sillä aaltovoiman energiantuotantoprosessi ei tuota itsessään lainkaan päästöjä. Aaltovoima sopisi hyvänä lisänä osaksi fossiilivapaata maailmankuvaa yhdessä esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman kanssa.

ABSTRACT

Petra Hanhijoki: Wave power as an energy production source
Master's Thesis
Tampere University
Automation Engineering
February 2020

In this Master's Thesis work the study reflects what it takes from wave power to be able to compete in industrial scale. The method used is a literary research which aims to use variety of different sources. At first wave power is studied as an energy production form. After which the competitiveness is being examined based on scalability, levelized costs, technology and environmental impact. These values are being compared to two other environmentally friendly energy production sources – solar and wind power.

The industrial scale of wave power can be seen to be a consequence of oil crisis in 1970's. Wave power converts the motion or potential energy of waves into electricity. Wave power system can be executed using oscillating water column, active wave body or overtopping method.

The scalability of wave power is not enough to produce the entire world's energy consumption. In theory it could still cover the electricity consumption in approximately billion households. The levelized costs of wave power are comparable even though it is 0,4€ higher per day than the current electricity price in Finland. Environmental benefit of wave power is significant based on GHG emissions. The actual energy production process doesn't produce any emissions. Wave power would be suitable addition into the fossil free future together with e.g. solar and wind power.

ALKUSANAT

Tämä työ on laadittu Tampereen yliopiston diplomityöohjeen pohjalta kirjallisuustutkimuksena. Työ on tehty ilman ulkopuolisia tahoja, työntekijän omien mieltymyksien pohjalta. Työn aihe palkittiin syksyllä Hydraulikan ja pneumatiikkayhdistyksen stipendillä.

Työ on omistettu pitkälle opiskelu-uralle ja kovalle yrittämiselle. Erityiskiitokset itse tekijälle sekä hänen lähipiirillensä.

Tampereella, 29.2.2020

Petra Hanhijoki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HISTORIA.....	3
3. AALTOVOIMAN TEORIA.....	7
3.1 Aaltojen muodostuminen.....	7
3.2 Sijainnin merkitys	9
3.3 Aaltojen sisältämä energia	10
4. AALTOVOIMAN TEKNOLOGIAT	12
4.1 Oskilloiva vesipatsas.....	13
4.1.1 LIMPET.....	14
4.1.2 Mutriku.....	15
4.2 Aktiivinen aaltorunko	16
4.2.1 Pelamis.....	17
4.2.2 Oyster	18
4.2.3 PB3.....	19
4.3 Ylitysmenetelmä.....	20
4.3.1 Wave Dragon.....	21
4.3.2 SSG	22
5. AALTO-, TUULI- JA AURINKOVOIMAN VERTAILU	23
5.1 Skaalautuvuus	23
5.2 Teknologia	26
5.3 Kustannukset	28
5.4 Ympäristö.....	31
6. TULOSTEN TARKASTELU.....	33
7. YHTEENVETO.....	36
LÄHTEET	38

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Maailman ensisijaisten energianlähteiden kokonaistuotanto polttoaineen osalta vuosina 1971-2016 (KWES 2018, s. 2).....</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Ympyrädiagrammi maailman ensisijaisten energianlähteiden kokonaistuotanto polttoaineen osalta vuosina 1973 ja 2016 (KWES 2018, s. 2).....</i>	<i>4</i>
Kuva 3.	<i>Ympyrädiagrammi maailman sähköntuotannosta vuosilta 1973 ja 2016 (KWES 2018, s. 14).</i>	<i>5</i>
Kuva 4.	<i>Sinimuotoinen aalto ja sen parametrit (Kofoed et al. 2017, s. 47).....</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>Merikartta vuosittaisesta keskiarvallisesta tehotiheydestä (Kofoed et al. 2017, s. 45).</i>	<i>9</i>
Kuva 6.	<i>IEA:n mukainen WEC-kategorisointi, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 24).</i>	<i>12</i>
Kuva 7.	<i>Esimerkkikuva OWC-järjestelmästä (Barater et al. 2016, s. 1699).</i>	<i>13</i>
Kuva 8.	<i>OWC-järjestelmä LIMPET (Boake et al. 2002, s. 586).....</i>	<i>15</i>
Kuva 9.	<i>OWC-järjestelmä Mutriku (Heras-Saizarbitoria et al. 2013, s. 519).....</i>	<i>16</i>
Kuva 10.	<i>WAB-teknologian alakategorisointi. (Cruz 2008, s.45).....</i>	<i>16</i>
Kuva 11.	<i>WAB-järjestelmä Pelamis (Kofoed et al. 2017, s. 28).</i>	<i>18</i>
Kuva 12.	<i>WAB-järjestelmä Oyster (Kofoed et al. 2017, s. 32).</i>	<i>19</i>
Kuva 13.	<i>WAB-järjestelmä PB3 (OPT).</i>	<i>20</i>
Kuva 14.	<i>Ylitysmenetelmäjärjestelmän rakenne ja toimintaperiaate, muokattu lähteestä (Bevilacqua et al. 2011, s. 11-12).....</i>	<i>21</i>
Kuva 15.	<i>Wave Dragon -ylitysmenetelmäjärjestelmän prototyyppi, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 37).....</i>	<i>21</i>
Kuva 16.	<i>Ylitysmenetelmäjärjestelmä SSG (Frigaard et al. 2008, s. 1373).....</i>	<i>22</i>
Kuva 17.	<i>Andorra, Albania ja Venäjä Euroopan kartalla, muokattu lähteestä (Wikimedia Commons 2011).</i>	<i>26</i>
Kuva 18.	<i>Fossiilivapaa tulevaisuuden hahmotelma, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 19).</i>	<i>35</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>GHG</i>	<i>Greenhouse Gas</i>
<i>IEA</i>	<i>The International Energy Agency</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<i>LIMPET</i>	<i>Land Installed Marine Pneumatic Energy Transmitter</i>
<i>OPT</i>	<i>Ocean Power Technologies</i>
<i>OWC</i>	<i>Oscillating Water Columns</i>
<i>PB3</i>	<i>PowerBuoy kolme</i>
<i>PV</i>	<i>Photovoltaics</i>
<i>SSG</i>	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
<i>UNCLOS</i>	<i>United Nations Law of the Sea Convention</i>
<i>WAB</i>	<i>Wave Activated Body</i>
<i>WEC</i>	<i>Wave Energy Converter</i>
<i>a</i>	amplitudi
<i>C_{hankinta}</i>	WEC:n hankintakustannukset
<i>C_{kiinnitys}</i>	kiinnitysjärjestelmän sekä sen asennuksen hinta
<i>C_{offkaapeli}</i>	vedenalaisen kaapelin hinta per pituusyksikkö
<i>C_{onkaapeli}</i>	maanalaisen kaapelin hinta per pituusyksikkö
<i>C_{säh.ase.}</i>	sähköasennuksen hinta
<i>C_{säh.jak.kes.}</i>	sähkönjakelukeskuksen hinta
<i>C_t</i>	tulevaisuuden kustannukset
<i>C_{WEC}</i>	yksittäisen muuntajan sekä sen asennuksen hinta
<i>E</i>	aallon sisältämä energia
<i>f</i>	taajuus
<i>g</i>	maan putoamiskiihtyvyys
<i>H</i>	aallonkorkeus
<i>L</i>	pituus
<i>L_{offshore}</i>	vedenalaisen kaapelin pituus
<i>L_{onshore}</i>	maanalaisen kaapelin pituus olemassa olevaan sähköverkostoon asti
<i>N</i>	hankittavien muuttujien määrä
<i>O_t</i>	tulevaisuuden tuotto
<i>P</i>	teho
<i>P_{val}</i>	diskonttaus nyky aikaan
<i>r</i>	diskonttausarvo
<i>S</i>	jyrkkyysluku
<i>T</i>	aikajakso
<i>TK</i>	tasoitettut kustannukset
<i>v</i>	nopeus
<i>λ</i>	aallonpituus
<i>ρ</i>	veden tiheys
<i>ω</i>	taajuus

1. JOHDANTO

Mitä vaaditaan, että energiantuotantomuoto on kilpailukykyinen teollisuuden mittakaavassa? Tässä kirjallisuustutkimuksessa pohditaan kyseistä kysymystä aaltovoiman osalta. Parametrit, joita tutkimuksessa käytetään, ovat skaalautuvuus, kustannukset, teknologia sekä ympäristövaikutukset. Näiden kategorioiden perusteella pyritään tekemään lopullinen johtopäätös aaltovoiman kilpailukyvyistä. Pohditaan, mikä on aaltovoiman rooli tulevaisuuden energiantuotannossa.

Skaalautuvuutta tarkastellaan pääasiassa teoreettisen tehon avulla. Jos oletetaan muiden tekijöiden olevan rajoittamattomia, kuinka paljon olisi mahdollista tuottaa tehoa aaltoenergiasta. Kustannuksissa verrataan tasoitettuja kustannuksia, koska siinä otetaan huomioon sekä elinkaarimenot että -tuotot. Kustannuksia tarkastellaan taloudellisen kilpailukyvyn takia. Teknologia pitää sisällään hyötysuhteen. Hyötysuhde kertoo, kuinka paljon järjestelmän ottamasta tehosta saadaan tuotettua hyödynnettävää tehoa (Kauranne et al. 2008, s. 78-83).

Ympäristövaikutuksien huomioiminen on tärkeää, sillä se on lähtökohta uusiutuvien ja ympäristöystävällisten energiantuotantomuotojen kehitykselle. Tässä tutkimuksessa ei voida hyväksyä sellaista energiantuotantomuotoa, missä tuottavuus on tehokasta, mutta se aiheuttaa liian suuria päästöjä. Kappaleessa 5 verrataan aaltovoimaa muihin uusiutuviin energiantuotantomuotoihin yllä mainittujen parametrien avulla. Tämän avulla tehdään lopullinen päätelmä aaltovoiman kilpailukyvyistä. Luvussa 6 julkaistaan tutkimuksen tulos.

Aaltovoiman alkamisajankohta on kiistanalainen, koska isolle aikavälille mahtuu monia merkittäviä tapahtumia 1800-luvusta lähtien. Teollisessa mittakaavassa aaltovoiman voidaan katsoa alkaneen 1970-luvulla öljykriisin seurauksena, niin kuin monien muiden uusiutuvien energiantuotantomuotojen. Öljykriisi nosti uusiutuvien energiantuotantomuotojen merkityksen uudelle tasolle. Käytännössä tästä seurasi sarja erilaisia tutkimus- ja kehityshankkeita sekä prototyyppikokeiluita ympäri maailmaa 70-luvusta aina 90-luvulle asti. Toiminta oli kuitenkin pääasiassa akateemista eikä saavuttanut kaupallista laajuutta. Euroopan komissio otti aaltovoiman mukaan uusiutuvien energiantuotantomuotojen R&D-ohjelmaan vuonna 1991. Tämän seurauksena vajaassa 20 vuodessa komissio rahoitti noin 30 aaltovoimaan liittyvää projektia. 2000-luvulle tultaessa kansainvälinen

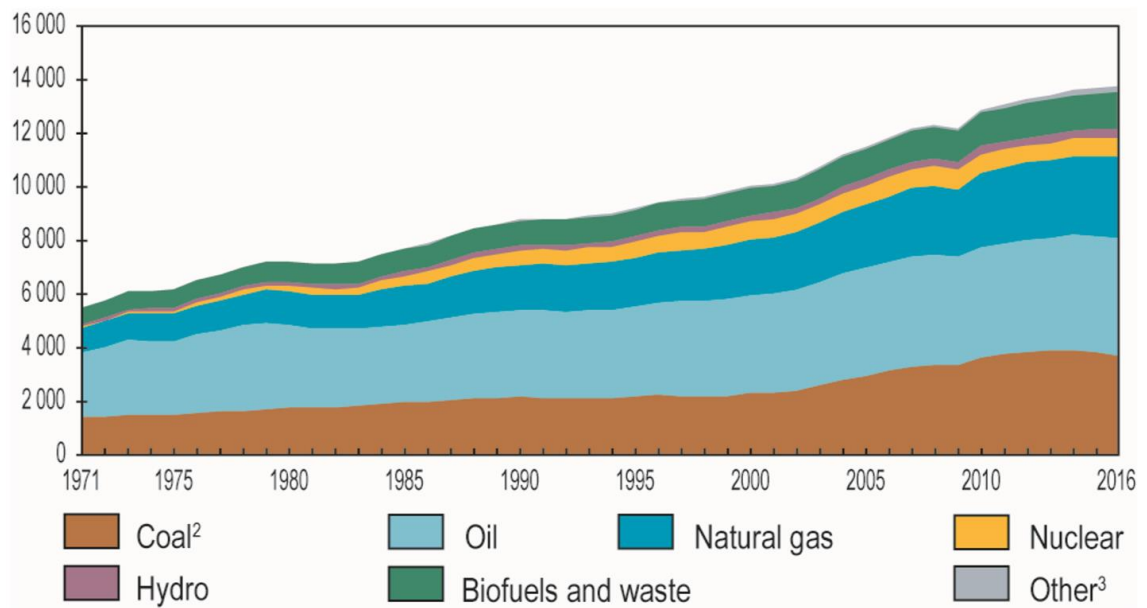
energiatoimisto eli The International Energy Agency (IEA) solmi 17 maan kesken sopimuksen koskien meriin sijoitettuja energiajärjestelmiä. Sopimuksen tarkoituksena oli kehittää näitä järjestelmiä yhteistyön ja jaetun informaation avulla. (Falcão 2010, s. 900) Lisää historiallista taustaa löytyy luvusta 2.

Aaltovoima valjastaa aalloissa olevan liike- tai potentiaalienergian sähköksi. Energiankulutuksen kasvaessa aaltovoima voidaan nähdä potentiaalisena lisänä energiantuotantoon. Aivan kuten tuuli- ja aurinkovoima myös aaltovoima on ympäristöystävällisyyden lisäksi loputon energianlähde. (Kofoed et al. 2017, s. 1) Loputon niin pitkään, kun aurinko paistaa. Aurinko synnyttää tuulet, jotka saavat aikaan aallot. Joskus näiden tuotto voi olla ajallisesti heikkoa ilmaolosuhteiden vuoksi, mutta se ei tarkoita, että ne olisivat resursseina loppu. Loputtomuuden lisäksi nämä energiantuotantomuodot ovat helposti saatavilla, eikä niin vahvasti sidottuna valtioiden rajojen sisäpuolelle (Kofoed et al. 2017, s. 1). Hyvä vertailtava vastakohta tuuli-, aurinko- ja aaltovoimalle on öljy. Se on sidottu tiettyihin öljyvaltioihin ja keskustelua sen loppumisesta on käyty vuosikymmeniä. Aaltojen syntymisprosessista, sijainnin merkityksestä sekä aaltojen sisältämästä energiasta kerrotaan lisää teorialuvussa 3.

Aalloista energiaa ottavia järjestelmiä kutsutaan aaltoenergiamuuntajiksi (WEC). On olemassa lukuisia eri tapoja muuntaa aaltojen voima energiaksi. Tästä syystä on olemassa useita eri tapoja jaotella järjestelmät kategorioihin. Jaottelu voidaan tehdä esimerkiksi toimintaperiaatteen tai sijainnin mukaan. Tässä työssä käytetään IEA:n määrittämää kategorisointia, jossa WEC:t on jaettu kolmeen pääryhmään. Nämä pääryhmät ovat oskilloiva vesipatsas (OWC), aktiivinen aaltorunko (WAB) ja ylitysmenetelmä. OWC:n rakenne sulkee veden niin, että muodostuu vesipatsas. OWC hyödyntää tämän vesipatsaan oskilloivaa liikettä. Espanjan Mutrikussa sijaitsee OWC, jonka kokonaiskapasiteetti on 300 kW. WAB mukautuu aallon liikkeeseen, mitä se hyödyntää energiantuotannossa. Skotlannissa sijaitsee Oyster 800 -niminen WAB, jonka kokonaiskapasiteetti on 800 kW. Ylitysmenetelmä liittyy veden ylityksessä kasvavaan potentiaalienergiaan, joka varastoidaan. (Kofoed et al. 2017, s. 22-37) Tanskassa sijaitsee Wave Dragon -niminen prototyyppi, jonka kokonaiskapasiteetti on 7 MW (Wave Dragon 2009). Tarkempia yksityiskohtia teknologioista sekä olemassa olevista järjestelmistä löytyy luvusta 4.

2. HISTORIA

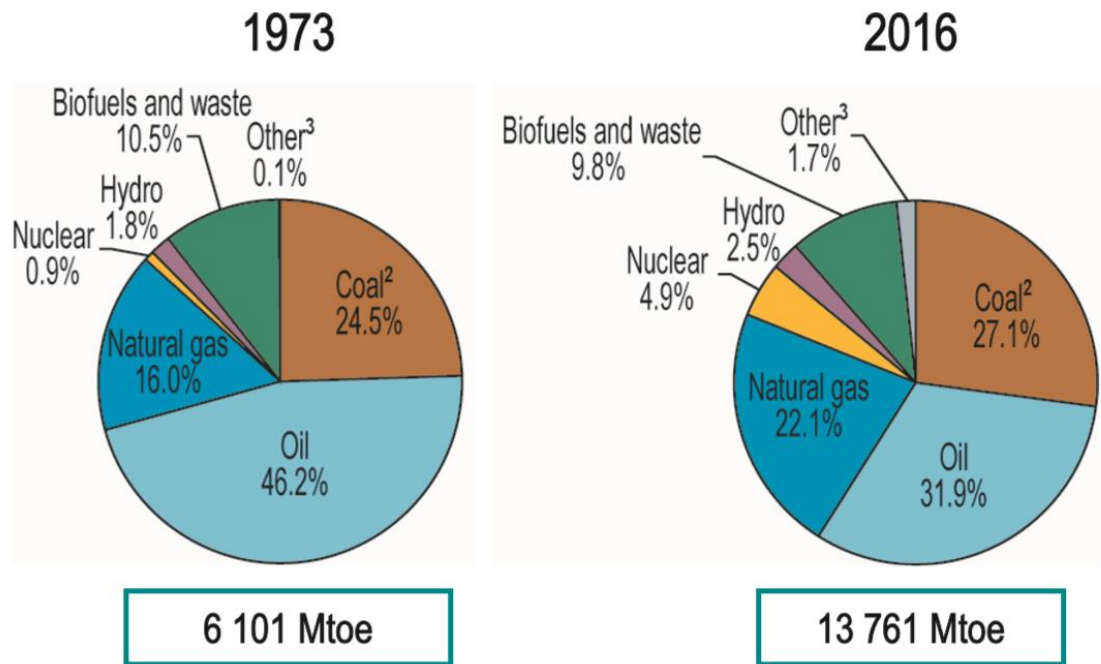
Kuvassa 1 on maailmanlaajuinen energianlähdekuvaaja. Kuva pitää sisällään ensisijaiset polttoaineeksi tarkoitetut energianlähteet. Ensisijaiset energianlähteet ovat hiili, öljy, maakaasu, ydinvoima, vesivoima, biopolttoaineet ja jäte sekä muut energianlähteet. Muihin energianlähteisiin kuuluvat geoterminen, aurinko-, tuuli- sekä vuorovesi-/aalto-/merienergiatuotanto (KWES 2018, s. 37).



Kuva 1. Maailman ensisijaisten energianlähteiden kokonaistuotanto polttoaineen osalta vuosina 1971-2016 (KWES 2018, s. 2).

Kuvasta 1 nähdään energiantuotannon olleen vajaa 6 000 Mtoe vuonna 1971. Vuoteen 2016 mennessä lukema kasvoi vajaaseen 14 000 Mtoe. Energiantuotanto on yli kaksinkertaistunut 45 vuodessa. Kehitys on ollut joko kasvavaa tai muuttumatonta lukuun ottamatta vuoden 2009 notkahdusta. Notkahdus on maailmanlaajuisen finanssikriisin aiheuttama, jolloin energian tuotto ja käyttö vähentyi huomattavasti (IEA 2010, s. 3).

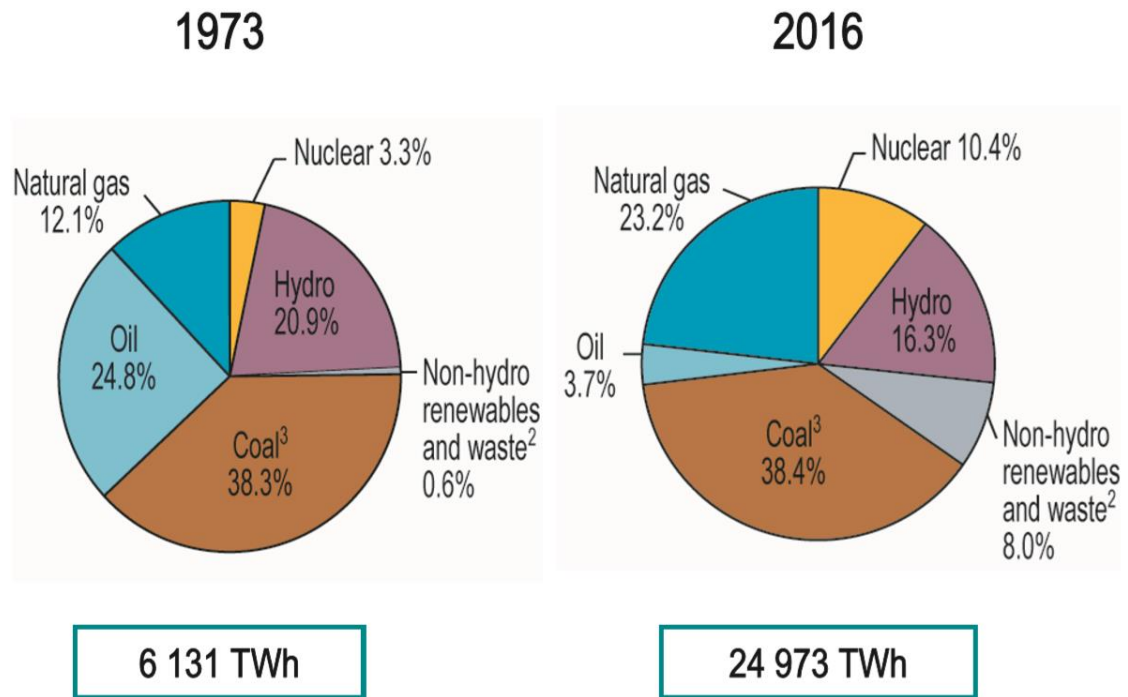
Maailman ensisijaiset energianlähteet on esitetty ympyrädiagrammimuodossa kuvassa 2. Kuvan vasemmanpuoleinen diagrammi edustaa vuoden 1973 osuuksia ja oikeanpuoleinen diagrammi vuoden 2016 vastaavia lukemia. Vuoden 1973 tuotanto oli 6 101 Mtoe ja vuoden 2016 tuotanto 13 761 Mtoe.



Kuva 2. Ympyrädiagrammi maailman ensisijaisten energianlähteiden kokonaistuotanto polttoaineen osalta vuosina 1973 ja 2016 (KWES 2018, s. 2).

Kuvasta 2 käy ilmi, että öljyn osuus on laskenut huomattavasti maakaasun ja ydinvoiman nostaessa osuuttaan. Hiilen kokonaisosuus on pysynyt lähestulkoon samana. Aaltovoima on jaoteltu muiden energianlähteiden alle yhdessä muun muassa aurinko- ja tuulivoiman kanssa. On hyvä huomata, että kokonaistuotannon kasvaessa muut energianlähteet ovat pystyneet pysymään kasvussa mukana ja jopa kasvattamaan osuuttaan.

Sähköntuotannon kehityksen näkee kuvasta 3. Se on polttoaineentuotannon tapaan esitetty ympyrädiagrammimuodossa vuosilta 1973 ja 2016. Vuoden 1973 sähköntuotanto oli 6 131 TWh ja vuoden 2016 tuotanto 24 973 TWh. Ympyrädiagrammissa esitetyt sähköntuotantomuodot ovat hiili, öljy, maakaasu, vesivoima, ydinvoima sekä jäte ja uusiutuvat tuotantomuodot – pois lukien vesivoima. Aaltovoima sisältyy viimeiseen kategoriaan (KWES 2018, s. 14).



Kuva 3. Ympyrädiagrammi maailman sähköntuotannosta vuosilta 1973 ja 2016 (KWES 2018, s. 14).

Kuvasta 3 voidaan huomata sähköntuotannon nelinkertaistuneen alle 50 vuodessa. Tämä tarkoittaa, että kunkin tuotantomuodon olisi pitänyt nelinkertaistua säilyttääkseen prosentuaalinen osuutensa. Hiilen osuus on pysynyt lähestulkoon samana. Öljyn ja vesivoiman osuudet ovat pienentyneet yhteensä 25,7 %. Maakaasu, ydinvoima sekä jäte ja uusiutuvat tuotantomuodot, ovat kasvattaneet osuuttaan 25,6 % verran. Näiden kasvu- ja laskusuhteiden tarkastelu on tärkeää, sillä ne kuvastavat, mihin suuntaan markkinat ovat kehittymässä.

Merkkejä aaltovoiman valjastamisesta energiantuotantoon löytyy 1800-luvulta lähtien. Esimerkiksi Kaliforniasta löytyy paljon erilaisia kokeiluja ja onnistumisia. Vuonna 1868 henkilö nimeltä Robertson aloitti projektin, jonka tarkoituksena oli rakentaa itsetuottoisa vene. Aallot tuottivat veneen tehon - mitä voimakkaammat aallot olivat, sitä nopeammin vene kulki. Hyvästä ideasta huolimatta vene päättyi meren pohjaan. Se oli suunniteltu vakaille aalto-olosuhteille, mikä ei käytännössä toteutunut. Robertsonin venettä voidaan silti pitää ainakin Kalifornian yhtenä ensimmäisenä aaltovoima kokeiluina. (Miller 2004) Ensimmäinen aaltovoimapatentti myönnettiin Girardin perheen isälle ja pojalle vuonna 1799 (Falcão 2010, s. 900). Tästä huolimatta vasta 200 vuoden jälkeen patentin myöntämisestä kiinnostus aaltovoimaa kohtaan alkoi kasvamaan merkittäviin mittakaavoihin.

Maailmanlaajuinen öljykriisi koettiin vuonna 1973. Tämä aiheutti yleisen huolen fossiilisia polttoaineita kohtaan ja kiinnostuksen uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. Yksi näistä kiinnostavista uusiutuvista energianlähteistä oli merien aallot. Öljykriisin voidaan katsoa aloittaneen aaltovoiman valjastamisen teollisessa laajuudessa. Konkreettisia ensiaskelia nähtiin muun muassa Iso-Britanniassa ja Norjassa, joiden hallitukset aloittivat tutkimus- ja kehityshankkeita. Lisäksi järjestettiin kansainvälisiä kongresseja, joissa perehdyttiin aaltovoiman potentiaaliin. Toiminta 80-luvulla ja 90-luvun alussa oli pääasiassa akateemista tutkimustyötä, mutta joitakin prototyyppejä rakennettiin. Esimerkiksi Norjaan rakennettiin kaksi täysikokoista prototyyppiä tehoiltaan 350 ja 500 kW. Skotlannin 90-luvun OWC-prototyyppi oli teholtaan 75 kW ja Japanin 60 kW. (Falcão 2010, s. 900)

Tälle vuosituhannelle tultaessa prototyyppejä ja käytössä olevia laitoksia löytyy ympäri maailmaa. Taulukosta 1 löytyy koonti olemassa olevista WEC-järjestelmistä sekä -prototyypeistä. Kustakin WEC:stä on esitetty sen nimi, vuosi, teknologiatyyppi, sijainti sekä teho.

Taulukko 1. Koonti olemassa olevista WEC-järjestelmistä sekä -prototyypeistä (Barater et al. 2016, s.1701; EMEC; Kofoed et al. 2017, s. 31; OPT; Wave Dragon 2009; Wave Dragon; Frigaard et al. 2008, s. 1371-1374).

NIMI	VUOSI	TEKNOLOGIA	SIJAINTI	TEHO
LIMPET	2000	OWC	Skotlanti	250 kW
Mutriku	2011	OWC	Espanja	300 kW
Pelamis	2010	WAB	Skotlanti	750 kW
Oyster	2001	WAB	Skotlanti	800 kW
PB3	-	WAB	-	8,4 kWh/päivä
Wave Dragon	2003	Ylitysmenetelmä	Tanska	1,5-12 MW
SSG	2003	Ylitysmenetelmä	Norja	10-20 GWh/vuosi

Lisää tietoa taulukon 1 koonnista löytyy teknologiakappaleesta 4. Suomalaisia toimijoita aaltovoiman parissa ovat muun muassa yritykset AW-Energy ja Wello. AW-Energyn WaveRollereita on kolme 100kW laitosta Portugalissa ja yksi 1,5 MW farmi suunnitteilla Ranskaan. Wellon Pingviini on vielä testivaiheessa. Muita aaltovoimaan lähteneitä isoja yrityksiä ovat muun muassa ABB, Mitsubishi Heavy Industries ja E.ON. (IRENA 2014, s. 12-13)

3. AALTOVOIMAN TEORIA

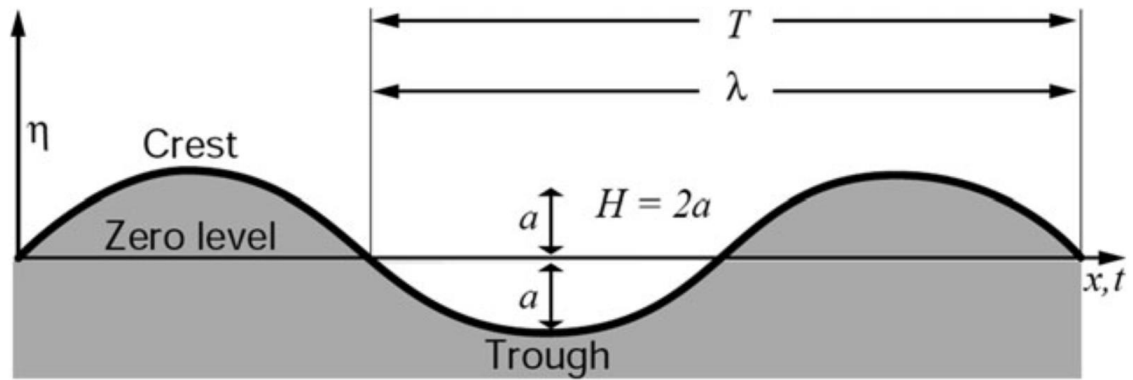
Tämän työn lähtökohtana on teoreettinen tarkastelu. Teoreettinen tarkastelu toteutetaan tutustumalla monipuolisesti eri lähteisiin. Lähteinä pyritään käyttämään laajasti eri kirjoittajien tutkimuksia – aina yksittäisistä artikkeleista kokonaisiin kirjoihin. Oman pohdinnan sekä kirjallisuuden avulla päätellään, mikä on aaltovoima potentiaali teollisilla markkinoilla.

Jotta voidaan tehdä valistunut päätelmä, tarvitaan sitä tukeva teoreettinen tausta. Oleelliset teoreettiset kategoriat ovat aaltojen muodostuminen, sijainnin merkitys sekä aaltojen sisältämä energia. Aaltojen muodostumisessa tarkastellaan, miten aallot syntyvät ja kehittyvät. Sijainnin merkitystä pohditaan selvittämällä, miten aalto-olosuhteita ennustetaan. Tämän jälkeen pyritään löytämään mahdollisimman optimaaliset olosuhteet WEC-järjestelmälle. Aaltojen sisältämään energiaan tutustutaan yhtälöiden avulla. Selvitetään, minkä tyyppinen aalto sisältää eniten energiaa. Näiden avulla saadaan käsitys, mitä WEC-teknologialta vaaditaan ja mitä mahdollisia haasteita teknologiasuunnittelussa voi ilmetä.

3.1 Aaltojen muodostuminen

Tuuli synnyttää aallon, kun se puhalttaa veden pintaa pitkin. Alkuun aalto on pieni kapillaariaalto. Se jatkaa kasvamista kohti maksimia niin kauan, kun tuulienergiaa adaptoituu aaltoon. Maksimi määräytyy häviöiden perusteella. Mitä suuremmat häviöt, sitä enemmän ne rajoittavat aallon koon kasvamista. Kun tuuli lakkaa, aalto jatkaa etenemistä. Tällöin sitä kutsutaan usein tulva-aalloksi. Tuulen suoran vaikutuksen perusteella aalto voidaan määrittää tuuli- tai tulva-aalloiksi. Hydrodynamiikkaan ei vaikuta, minkä tyyppinen aalto on. Sen avulla voidaan muodostaa arvio sijainnin aalto-olosuhteista. (Kofoed et al. 2017, s. 43-45)

Tuuli vaikuttaa aallon kokoon. Tärkeimmät parametrit tuulen osalta ovat tuulen nopeus sekä suunta. Aaltoa voidaan pitää sinimuotoisena. Aallon tärkeät mitattavat suureet ovat korkeus, aallonpituus sekä aikajakso. (Kofoed et al. 2017, s. 45-47) Kuvasta 4 löytyy sinimuotoinen aalto ja sen parametrit.



Kuva 4. Sinimuotoinen aalto ja sen parametrit (Kofoed et al. 2017, s. 47).

Kuvan 4 parametrit ovat: T aikajakso, λ aallonpituus, H aallonkorkeus ja a amplitudi. x -akseli kuvastaa aikaa tai matkaa. Se on myös niin sanottu nollataso. Lisäksi kuvaan on merkitty aallonharja sekä -pohja.

Näiden parametrien avulla voidaan edelleen määrittää taajuus, aaltovakio sekä jyrkkyysluku. Jyrkkyysluvun avulla voidaan määrittää, päteekö lineaarinen teoria vai ei. Jyrkkyysluku on aallon korkeus suhteessa aallonpituuteen. Jyrkkyysluku saadaan laskettua kaavalla

$$S = \frac{H}{\lambda}, \quad (1)$$

jossa S on jyrkkyysluku. Lineaarisuus voidaan olettaa, jos luku on pienempi kuin 0,01. Epälineaarisuus kasvaa, mitä suurempi luku on. (Kofoed et al. 2017, s. 46-47)

Tarkastelemalla voidaan huomata aallon muuttavan muotoaan edetessään. Kapillaari-aallon pituus on tyypillisesti kahden senttimetrin luokkaa. Kun tuulen vaikutus jatkuu, syntyy painovoima-aalto. Tämä aalto voi kasvaa aina 10 metristä jopa 50 metriin tuulen voimakkuudesta riippuen. Aalto murtuu, kun jyrkkyysluku on noin 0,14. Aallon nopeus voi saavuttaa jopa kolmanneksen tuulen nopeudesta. (Ekanayake et al. 2017 s. 254-255)

Sijainti vaikuttaa aallon muotoon ja kokoon. Tulva-aallot esiintyvät syvissä vesissä. Pienemmän taajuuden omaavat aallot voivat esiintyä rannikolla. Taajuus saadaan määritettyä kaavalla

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

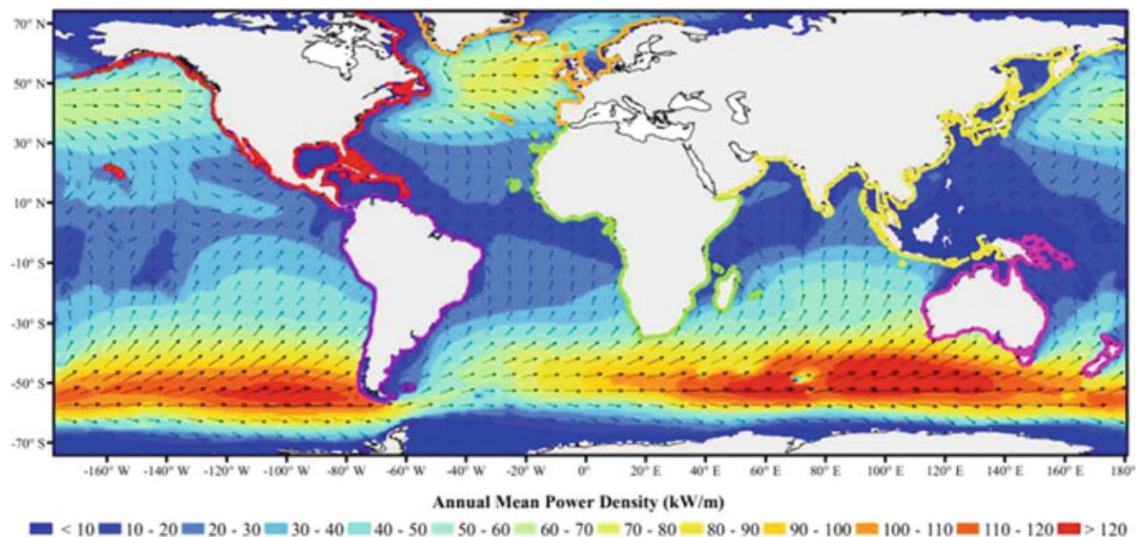
jossa ω on taajuus (Kofoed et al. 2017, s. 47). Aallon lähestyessä rantaa sen nopeus laskee, aallonpituus pienenee ja korkeus kasvaa, mikä johtaa aallon murtumiseen. (Ekanayake et al. 2017 s. 255)

3.2 Sijainnin merkitys

Ennen kun voidaan ymmärtää sijainnin merkitys, tulee kartoittaa vallitsevat olosuhteet. Tämä toteutetaan merien aaltojen ennustamisen avulla. Ennustaminen on hankalaa, koska aalto-olosuhteet ovat erittäin vaihtelevia. Yksi tärkeä asia ennustamisessa on ottaa huomioon ennustamisen epävarmuus. Tästä syystä merien sääolosuhteiden ennustamista pidetään todennäköisyysongelmana. (Juricke et al. 2018, s. 1947-1949)

Aaltojen ennustamisen lähtökohta on ollut energiatasapainoyhtälö 1960-luvulta lähtien. Se antaa arvion aaltospektristä ottamalla huomioon adiabaattiset tekijät sekä fysikaalisten ilmiöiden summan, joihin kuuluu tuuli, aaltojen hajoaminen sekä epälineaarisuustekijät. Ensimmäisen sukupolven meritutkimus käytti tasapainoyhtälöä ilman epälineaarisuustekijöitä. Toinen sukupolvi syntyi kuin epälineaarisuustekijöiden merkitys tajuttiin ja otettiin huomioon alkeellisessa tietokonemallintamisessa. Vaikka osa toisen sukupolven malleista on vielä käytössä tänä päivänä, nykypäivän supertietokoneet sekä sensoreilta saatu data ovat mahdollistaneet kolmannen sukupolven kehityksen. Kolmas sukupolvi tarjoaa tarkan aaltospektrin myös nopeasti vaihtuvissa olosuhteissa. (Janssen 2007, s. 3572-3575)

Kuvassa 5 on esitetty maailmankartassa merien vuosittainen tehotiheys. Kartta paljastaa tehotiheydeltä optimaalisimmat alueet. Tummansininen väri merkitsee lukuarvolta pienintä ja punainen suurinta tehotiheyden arvoa. Realistisessa sijainnin valinnassa tulee ottaa tämän lisäksi huomioon WEC-järjestelmän ideaaliolosuhteet sekä sen mahdolliset fyysiset rajoitteet.



Kuva 5. Merikartta vuosittaisesta keskiarvallisesta tehotiheydestä (Kofoed et al. 2017, s. 45).

Kuvan 5 perusteella eteläisen pallonpuoliskon merialueet – Intian ja Tyyni valtameri sekä Pohjois-Amerikan rannikko – näyttäisivät olevan tehotehokkuudeltaan parasta aluetta käytettäväksi. Näillä alueilla vuosittainen tehotehokkuus on suurempaa kuin 100 kW/m. Tätä voidaan verrata pohjoisen Atlantin valtameriin sekä Euroopan läntiseen rannikkoon, missä vuosittainen tehotehokkuus on 70-100 kW/h. Tehotehokkuudeltaan pienimmät luvut löytyvät päiväntasaajan kohdalta sekä pohjoisen napapiirin yläpuolelta ja eteläisen napapiirin alapuolelta. Kun mietitään potentiaalista paikkaa WEC-järjestelmälle, suotuisa tehotehokkuus tulisi olla suurempi kuin 15 kW/m (Kofoed et al. 2017, s. 13).

Olemassa olevista WEC-laitteistoista suurin osa on avomerellä. Siellä teho saadaan maksimoitua, vaikka asennus- sekä kuljetuskustannukset ovat suuremmat ja pääsy laitteistoihin käsiksi haastavampaa. (Ekanayake et al. 2017, s. 255-256) Optimi sijoitus-syvyys vesistöissä on 30-60m, kun otetaan huomioon asennus- ja kaapelointikustannukset. Sijainti rannikolla on hyödyllinen infrastruktuurin ja loppukäyttäjän näkökulmasta. Taloudellisesti sijainti rannikolla vähentää investointi- ja ylläpitokustannuksia. (Kofoed et al. 2017, s. 13)

Pääsääntöisesti meret eivät ole kenenkään omaisuutta. Meret kattavat ison osan maapallon pinta-alasta sekä ovat resurssi monelle toiminnalle, kuten kuljetukselle ja kalastukselle. Resursseja käytetään myös isossa mittakaavassa yritystoiminnassa. United Nations Law of the Sea Convention lyhennetään UNCLOS ja se tarkoittaa yhdistyneiden kansakuntien laki meristä -sopimusta. Se on määritetty yhteistyön ja rauhan takaamiseksi. Sopimuksen avulla on ratkaistu monia merien käyttöön liittyviä ongelmia. Näistä esimerkkinä alueelliset merirajat 12 mailia rannasta sekä yksinomaiset taloudelliset alueet aina 200 mailiin asti. (United Nations)

Parhaan sijainnin valinnassa on monia kriteerejä. Tasoitetut kustannukset konkretisoivat kunkin sijainnin potentiaalin arvoksi. Esimerkkejä hyvistä sijainneista ovat Australia, Uusi-Seelanti, Etelä-Afrikka, Chile, Argentiina, Uruguay, Etelä-Brasilia, Amerikan länsi- ja itärannikko sekä Eurooppa. (Kofoed et al. 2017, s. 13)

3.3 Aaltojen sisältämä energia

Yksittäisen aallon sisältämä energia on suoraan verrannollinen korkeuden neliöön. Yksittäisen aallon sisältämä energia voidaan laskea kaavalla

$$E = 0.5 * \rho * g * H^2 / 16, \quad (3)$$

jossa E on aallon sisältämä energia, ρ on veden tiheys ja g on maan putoamiskihti-tyvyys. Toisin sanoen, mitä korkeampi aalto on sitä enemmän se sisältää energiaa. Todellisuus-

nessa, jos halutaan tietää aaltojen sisältämä energia, pitää tarkastella nopeutta. Nopeutta tarkastellaan, koska merissä ei esiinny teoreettisia yksittäisiä aaltoja. Nopeus saadaan laskettua kaavalla

$$v = \lambda * f , \quad (4)$$

jossa v on nopeus ja f on taajuus. Kun nopeus yhdistetään yksittäisen aallon energia-kaavaan, saadaan laskettua tehotiheys vesistössä, jossa syvyys on suurempaa kuin puolikas aallonpituus. Tehotiheys saadaan laskettua kaavalla

$$\frac{P}{L} = \rho * g^2 * H^2 * \frac{T}{64 * \pi} \sim 0.5 * a^2 * T , \quad (5)$$

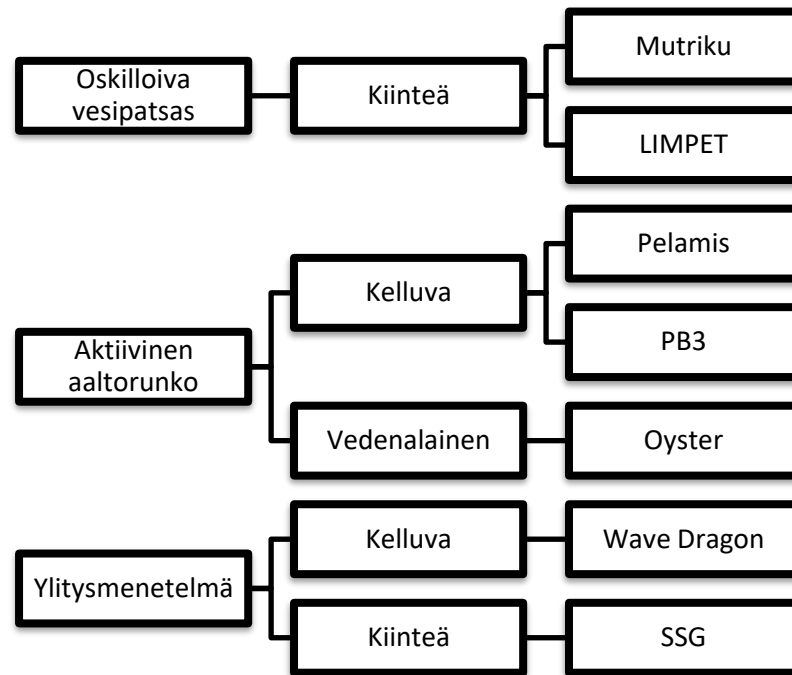
jossa P on teho ja L on pituus. Kaavan 4 pituutta ei tule sekoittaa aallonpituuteen. Tätä pituutta käytetään, jotta saadaan tietää tehon arvo pituusyksikkö metriä kohden. (Nelson 2011, s. 262-263)

Aaltojen sisältämä energia vähenee, mitä lähemmäksi rantaa tullaan. Energiahäviöt kasvavat, mitä lähempänä rantaa ollaan. Veden syvyyden ollessa 20 metriä, energia putoaa kolmannekseen verrattuna syvyyteen, joka on suurempaa kuin puolikas aallonpituus. Kun veden syvyys on pienempi kuin puolikas aallonpituus, energiahäviöiden osuus kasvaa huomattavasti. (Nelson 2011, s. 263) Energiahäviöitä matalissa vesissä aiheuttaa merenpohjan kitka ja aallon murtuminen (Ekanayake et al. 2017, s. 255).

Tarkastellaan, missä syvyydessä aallot sisältävät eniten energiaa. Arviolta 95% aaltojen sisältämästä energiasta sijoittuu meren pinnasta syvyydelle, mikä on pienempää kuin neljäsosa aallonpituudesta (Ekanayake et al. 2017, s. 260). Tämän perusteella WEC-järjestelmät olisivat kannattavimpia sijoittaa merenpinnan tuntumaan kuin esimerkiksi kokonaan merenpohjaan upotettuna.

4. AALTOVOIMAN TEKNOLOGIAT

WEC-järjestelmä voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Tästä syystä on olemassa myös lukuisia erilaisia kategorisointitapoja. Tässä työssä käytetään IEA:n määrittämää kategorisointia kuvan 6 mukaan. Kuvaa on muokattu kattamaan tämän työn vaatimukset.



Kuva 6. IEA:n mukainen WEC-kategorisointi, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 24).

Kuvan 6 ensimmäisessä sarakkeessa WEC-järjestelmät on jaettu kolmeen pääkategoriaan – oskilloiva vesipatsas, aktiivinen aaltorunko ja ylitysmenetelmä. Toiseen sarakkeeseen on määritetty pääkategorioiden eri rakennetyypit – kiinteä, kelluva ja vedenalainen. Viimeisessä sarakkeessa on lueteltu esimerkkejä olemassa olevista laitoksista tai prototyypeistä.

Teknologian suunnittelussa tulee ottaa huomioon seuraavat seikat – energian talteenotto, hinta, huollettavuus sekä ääriolosuhteet (Ekanayake et al. 2017, s. 267). Riippumatta, minkä tyyppisestä WEC-järjestelmästä on kyse, rakenne voidaan jakaa neljään osaa:

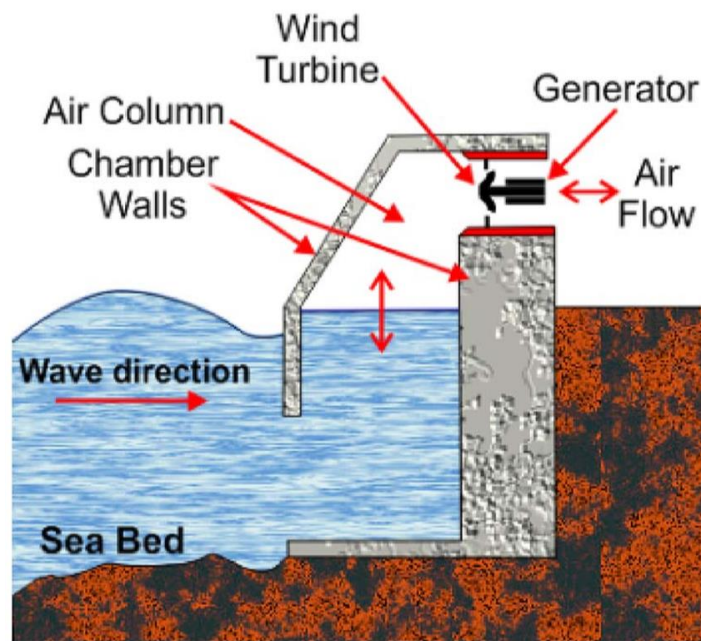
- fyysinen rakenne
- kiinnitysjärjestelmä
- tehonottojärjestelmä
- säätöjärjestelmä

Fyysinen rakenne sitoo aalloissa olevan energian. Kiinnitysjärjestelmä pitää fyysisen rakenteen paikallaan. Tehonottojärjestelmä muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Säätöjärjestelmä takaa optimin ja turvallisen käytön. (IRENA 2014, s. 5)

Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi tämän hetkiset teknologiset saavutukset niin teorian kuin konkretian osalta. Toisin sanoen puretaan kuva 6 sanoiksi. Kun saadaan ymmärrys nykyhetkestä, voidaan sen pohjalta rakentaa tulevaisuuden skenaarioita.

4.1 Oskilloiva vesipatsas

Oskilloiva vesipatsas sisältää nimensä mukaan vesipatsaan, joka on osittain suljetun rakennelman sisällä kuvan 7 mukaan. Vesipatsaan päällä on ilmapatsas. Hitaasti oskilloiva vesipatsas aiheuttaa edestakaista ilmavirtaa, joka muutetaan turbiinin avulla yksisuuntaiseksi pyörimisliikkeeksi. (Ekanayake et al. 2017, s. 268) Oskilloiva patsasmenetelmä perustuu aaltojen aiheuttaman ilmanpaineen muutokseen järjestelmän sisällä. Järjestelmän paine kasvaa, kun aalto saapuu. Paine laskee, kun aalto poistuu. (Nelson 2011, s. 264)



Kuva 7. Esimerkkikuva OWC-järjestelmästä (Barater et al. 2016, s. 1699).

Järjestelmän pääkomponentit ovat oskilloivat kammiot, turbiinit, sähkögeneraattorit ja sähköiset tehon muuntimet (Barater et al. 2016, s. 1699). Tähän asti laitteistot on rakennettu rantaan tai lähelle rantaa. Ne on asennettu merenpohjaan kiinni tai siitä irti kelluen. Rantaan rakennetut järjestelmät vaativat paljon rakennustyötä myös veden alla. Veden alle pitää asentaa alusta, jotta kitkahäviö saadaan minimoitua. (Ekanayake et al. 2017, s. 268) Niin sanottu kolmannen sukupolven sovellus on syviin vesiin suunniteltu kelluva ison kapasiteetin OWC-järjestelmä (Barater et al. 2016, s. 1700).

Järjestelmän rakenteen mitoituksella on merkitystä. Järjestelmä resonoi vesipatsaan koon perusteella, mikä pitää ottaa huomioon järjestelmän massaa ja jäykkyyttä mitoittaessa. Ilmakammion koon määrittää aallonkorkeus ja jaksonaika, jolle se on suunniteltu. (Ekanayake et al. 2017, s. 268) Kammion tehtävänä on muuttaa hidas aaltoliike nopeaksi ilmavirraksi turbiinin läpi. Tämän optimointiin vaikuttaa kammion mitoitus. Kammion mitoitus on hyötysuhteenkin kannalta tärkein tekijä. Kammion mitoitus suunnitellaan käyttöpaikan yleisimmän aaltotyypin mukaan vastaamaan vesipatsaan luonnollista taajuutta. Toinen tärkeä hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on turbiini ja generaattori yhdistelmä. Turbiini vaimentaa kammion toimintaa ja generaattori vaikuttaa turbiinin toimintaan. (Barater et al. 2016, s. 1700)

Tyypillisesti nämä järjestelmät eivät ole joustavia muutoksille. Ne ovat kiinteitä rakennelmia ja suunniteltu tietyille aaltotyypille. (Barater et al. 2016, s. 1700) Tämä on OWC-järjestelmien huono puoli. Monet olemassa olevat laitteistot ovat kärsineet tuhoja rakennusvaiheessa isojen aaltojen takia (Ekanayake et al. 2017, s. 268).

4.1.1 LIMPET

LIMPET muodostuu sanoista Land Installed Marine Pneumatic Energy Transmitter (Curran et al. 2005, s. 1056). LIMPET sijaitsee Skotlannin rannikossa. Se on rakennettu ja kytketty sähköverkkoon vuonna 2000. (Barater et al. 2016, s. 1702) Kuvasta 8 nähdään LIMPET:n ulkoinen rakenne.



Kuva 8. OWC-järjestelmä LIMPET (Boake et al. 2002, s. 586).

LIMPET:n alkuperäinen turbiinin teho oli 500 kW, mutta se alennettiin 250 kW (Barater et al. 2016, s. 1701). LIMPET:stä saatavaa kirjallisuutta on olemassa. Kirjallisuuden yksityiskohtaisuus teknisistä tiedoista on kuitenkin melko vähäistä esimerkiksi seuraavaksi käsiteltävään Mutrikin laitokseen verrattuna.

4.1.2 Mutriku

Espanjassa Mutrikin murtovesissä sijaitsee rannikkorakennelmaan integroitu OWC. Mutriku on rakennettu vuonna 2011 (Barater et al. 2016, s. 1701). Kuvasta 9 nähdään järjestelmän sijainti sekä ulkoinen rakenne.

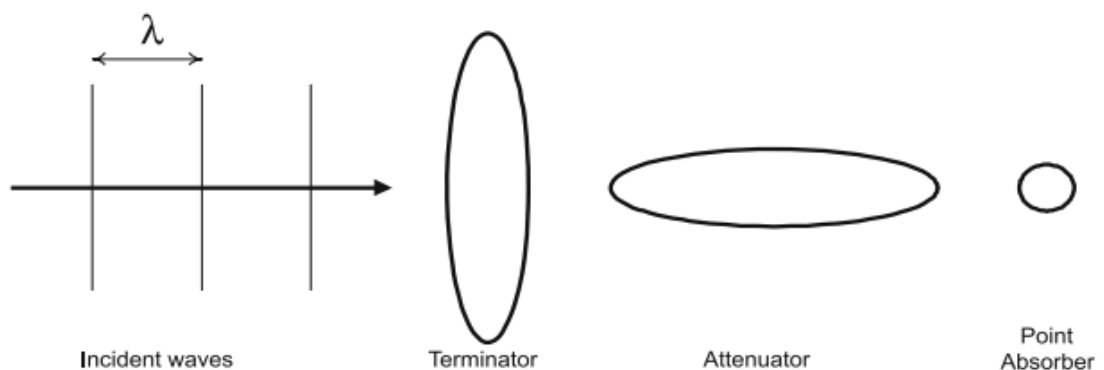


Kuva 9. OWC-järjestelmä Mutriku (Heras-Saizarbitoria et al. 2013, s. 519).

Mutriku on varustettu 300 kW ulostulolla. Järjestelmä sisältää 16 ilmakammiota. (Barater et al. 2016, s. 1701) Järjestelmässä käytetyt turbiinit ovat Wells-turbiineja, jotka ovat asennettu vertikaalisesti. Sen vuosittaisen tehon on arvioitu olevan 600 000 kWh (Heras-Saizarbitoria et al. 2013, s. 519).

4.2 Aktiivinen aaltorunko

Aktiiviset aaltorungot voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan energian talteenottoperiaatteen perusteella. Nämä kategoriat ovat pisteabsorboija, terminaattori ja vaimennin (Ekanayake et al. 2017, s. 270). Kuva 10 on hahmotelma kunkin kaappaustyylin toimintaperiaatteesta.



Kuva 10. WAB-teknologian alakategorisointi. (Cruz 2008, s.45)

Kuten kuvasta 10 voidaan huomata, että pisteabsorboijat ovat aallon kokoon verrattuna pieniä järjestelmiä. Ne oskilloivat vertikaalisessa suunnassa. Aallon tulosuunnalla ei ole väliä, sillä ne ovat symmetrisiä joka suuntaan. Terminaattorit ovat kooltaan isoja vaakasuuntaisia järjestelmiä. Ne ovat suunnattu samaan suuntaan aallon kanssa. Vaimennin on samankaltainen kuin terminaattori, mutta se on aaltoon nähden kohtisuorassa. (Cruz 2008, s. 45)

Kuten aikaisemmin on todettu, WEC-kategorisointitapoja on useita. Tämän työn kategorisoinnissa pisteabsorboijaa, terminaattoria ja vaimenninta käytetään WAB-järjestelmien alaluokituksena. Olisi myös mahdollista, että kelluvien WEC-järjestelmien yläluokituksena käytettäisiin pisteabsorboijaa, terminaattoria ja vaimenninta (Cruz 2008, s. 45). Näiden alaluokkien keskinäiset toimintatavat eroavat huomattavasti toisistaan. Seuraavat esimerkkijärjestelmät antavat paremman kuvan WAB-järjestelmien teknisestä toteutuksesta.

4.2.1 Pelamis

Pelamis on WAB-järjestelmästä, joka hyödyntää vaimennin metodia. Sen toiminta perustuu sylintereihin, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa saranoiduin nivelin. Aaltoliike liikuttaa niveliä. Tämä puolestaan saa sylinterit liikkumaan. Moottori pyörittää generaattoria, joka tuottaa tehoa. Ennen moottoria on tasoittava akku. Teho johdetaan kaapelin avulla merenpohjaan. Merenpohjasta se voidaan edelleen siirtää rannikolle yhteisen merikaapelin avulla. (Nelson 2011, s. 264) Kuva 11 on järjestelmäkuva Pelamiksesta.

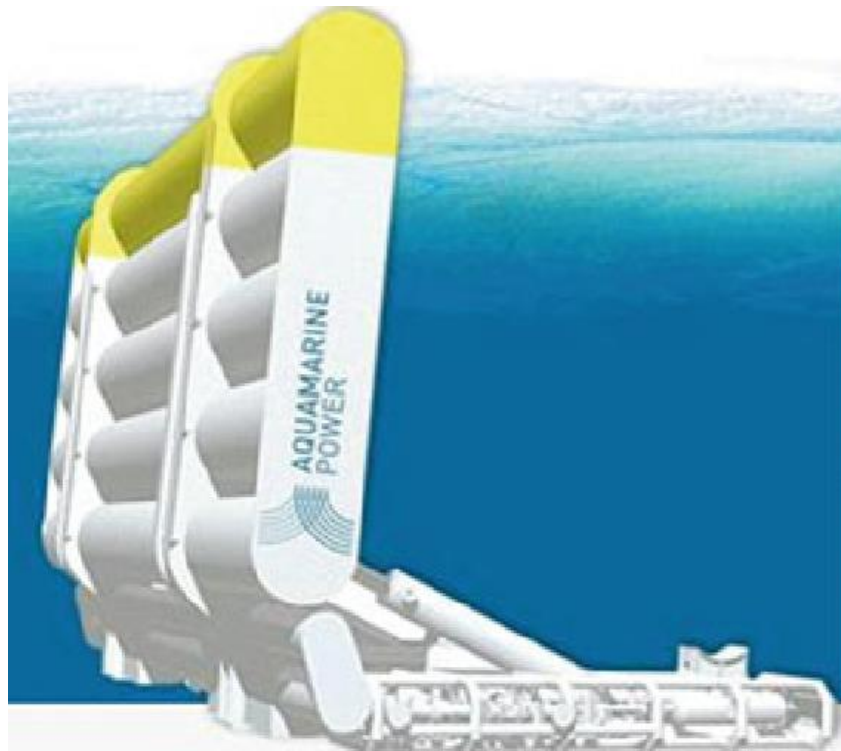


Kuva 11. WAB-järjestelmä Pelamis (Kofoed et al. 2017, s. 28).

Kuten kuvasta 11 näkee, Pelamis koostuu viidestä lieriöosasta. Näiden lieriöiden välisillä nivelillä on kaksi mahdollista liikesuuntaa. Koko järjestelmä on ohjattu suuntautumaan aallon tulosuunnan mukaan. (Kofoed et al. 2017, s. 27-28) Toisen sukupolven Pelamis-malli P2:sen teho on 750 kW. P2 asennettiin Skotlannin Orkneysaarille vuonna 2010. (EMEC)

4.2.2 Oyster

Oyster on terminaattori WAB-järjestelmä, jonka omistaa yritys nimeltä Aquamarine. Järjestelmä on julkistettu vuonna 2001 ja se sijaitsee Skotlannissa. (Kofoed et al. 2017, s. 31-32). Kuvasta 12 näkee Oysterin rakenteen.



Kuva 12. WAB-järjestelmä Oyster (Kofoed et al. 2017, s. 32).

Kuten kuvasta 12 voi huomata, järjestelmä koostuu kannesta ja merenpohjaan kiinnitystä alustasta. Energiaa tuotetaan, kun kansi liikkuu edestakaisin. Kannen ja alustan välinen liike muutetaan energiaksi hydraulipumpun avulla. Viimeisimmän sukupolven Oyster 800 pystyy nimensä mukaan tuottamaan 800 kW tehon. (Kofoed et al. 2017, s. 31)

4.2.3 PB3

PB3 kirjaimet tulee sanoista PowerBuoy kolme. PB3 on OPT:n eli Ocean Power Technologiesin omistama. PB3 on meren pinnalla kelluva kuvan 13 mukainen pisteabsorboija WAB-järjestelmä. (OPT)

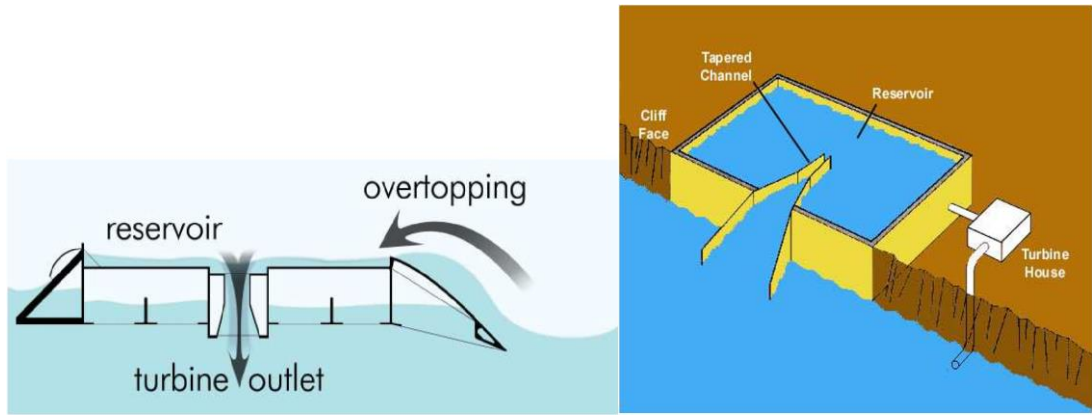


Kuva 13. WAB-järjestelmä PB3 (OPT).

Kuvan 13 järjestelmä käyttää referenssilevyä. Se toimii vertailutasona tehontuotossa. (Kofoed et al. 2017, s. 29) PB3 soveltuu 20-3000 m syvyyksiin. Sen tuottama energia muutetaan sähköksi, joka varastoidaan energiavarastoon. Energiavaraston teho johdetaan loppukäyttäjälle. Energiavarasto tasoittaa vaihtelevaa energiantuotantoa. PB3 tuottaa keskimäärin 8.4 kWh/ päivä. (OPT)

4.3 Ylitysmenetelmä

Ylitysmenetelmässä aallot etenevät kanavan tai rampin kautta uuteen potentiaaliin. Sieltä ne johdetaan säiliön kautta turbiinin läpi. Ylitysmenetelmäjärjestelmiä on mahdollista sijoittaa rannikolle tai merelle. (Nelson 2011, s. 264) Kuvasta 14 näkee järjestelmän toimintaperiaatteen sekä rakenteen.



Kuva 14. Ylitysmenetelmäjärjestelmän rakenne ja toimintaperiaate, muokattu lähteestä (Bevilacqua et al. 2011, s. 11-12).

Vasemmanpuoleisessa kuvassa vesi johdetaan rampin kautta tankkiin ja turbiiniin läpi. Se on sijoitettu merelle. Kyseessä on kelluva järjestelmä. Oikeanpuoleisessa kuvassa vesi kulkee kanavan kautta tankkiin ja uuteen potentiaaliin. Tässäkin tapauksessa vesi johdetaan tankista turbiiniin. Tämä järjestelmä on kiinteästi rakennettu mantereelle.

4.3.1 Wave Dragon

Wave Dragon on kehitetty Tanskassa, mutta sillä on yhteistyökumppaneita eripuolelta maailmaa. Wave Dragon on ulapalla kelluva alusta. (Wave Dragon) Kuvassa 15 näkyy Wave Dragon -järjestelmän prototyyppi.

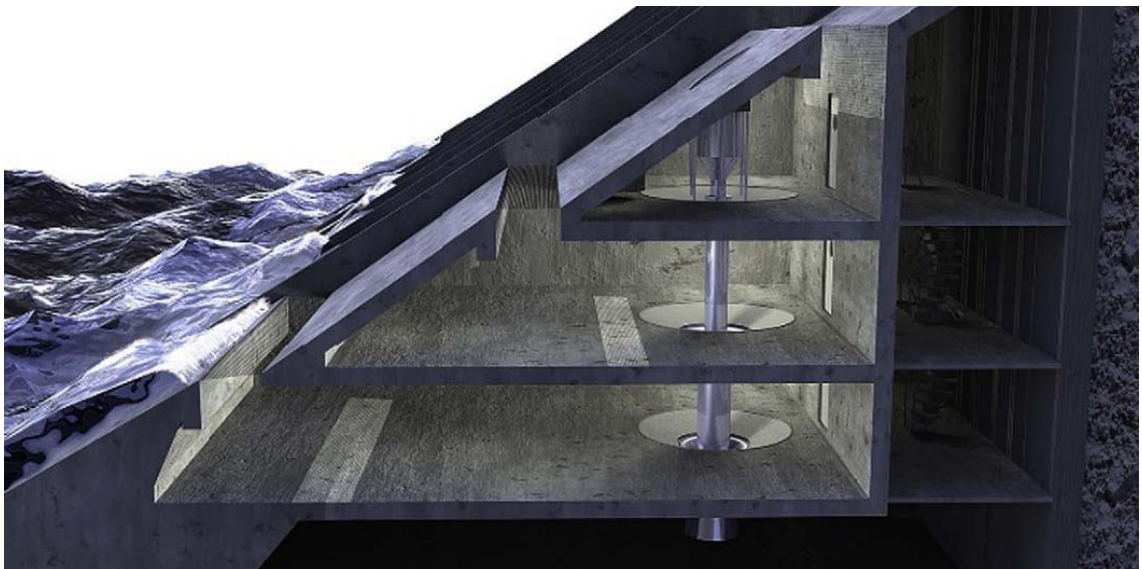


Kuva 15. Wave Dragon -ylitysmenetelmäjärjestelmän prototyyppi, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 37).

Kuvassa 15 Wave Dragonin prototyyppi on suuruusluokassa 1:4.5. Kyseinen prototyyppi sijaitsee Tanskassa. (Kofoed et al. 2017, s. 37) Wave Dragon toimii, kuten kelluva ylitysmenetelmäjärjestelmä aikaisemmin selitettiin. Vesi johdetaan rampin kautta säiliöön, mistä se ajetaan turbiinien läpi, jolloin se tuottaa sähköä. Ideaali sijainti järjestelmälle on vähintään 25 m rannasta, mutta mielellään yli 40 metriä rannasta. Wave Dragon on mahdollista saada eri ko'issa välillä 1,5-12 MW. Sen ensimmäinen ison mittakaavan prototyyppi julkaistiin vuonna 2003. (Wave Dragon)

4.3.2 SSG

SSG tulee sanoista Sea Slot-cone Generator. Laitteiston kehittäjä on norjalainen yritys WAVEnergy AS. Laitteisto patenttoitiin vuonna 2003. SSG:n rakenne koostuu vedenpinnan yläpuolella olevista kerrostetuista säiliöistä kuva 16 mukaisesti. (Frigaard et al. 2008, s. 1371)



Kuva 16. Ylitysmenetelmäjärjestelmä SSG (Frigaard et al. 2008, s. 1373).

Vesi ohjautuu kuhunkin säiliöön aallon korkeuden mukaan. Vesi johdetaan takaisin mereen turbiinin kautta, joka tuottaa sähköä. WAVEnergy AS arvio teolliskokoisen SSG:n tuottavan 10-20 GWh/vuosi sähkön hinnalla 0,12 €/kWh. (Frigaard et al. 2008, s. 1371-1374)

5. AALTO-, TUULI- JA AURINKOVOIMAN VERTAILU

Ilmastonmuutos ajaa yhteiskunnan miettimään, miten kasvihuonekaasuja saataisiin vähennettyä. Energiasektori aiheuttaa 35 prosenttia kasvihuonekaasuista (Diesendorf et al. 2018, s. 318). On olemassa monia erilaisia vaihtoehtoja, kuinka asia tulisi ratkaista. Nämä ratkaisut voidaan jakaa kahteen kategoriaan – kasvihuonekaasujen poistamiseen tuotannon jälkeen tai kasvihuonekaasuttomien ratkaisuiden suosiminen. Tässä työssä pohditaan jälkimmäistä, sillä se vaikuttaa kokonaisvaltaisena ja kestäväenä ratkaisuna paremmalta.

Kaksi tunnustetusti ympäristöystävällistä energiatuotannon tapaa on saavuttanut jalsijan energiamarkkinoilla – aurinko- ja tuulivoima. Tästä syystä näitä kahta on hyvä pitää vertailukohtana sille, mitä vaaditaan, että ympäristöystävällinen energiantuotantomuoto hyväksytään laajasti osaksi energiamarkkinoita.

Näkökulmat, joista asiaa tarkastellaan, ovat skaalautuvuus, teknologia, kustannukset ja ympäristöystävällisyys. Skaalautuvuutta tarkastellaan, koska halutaan tietää, kuinka suuren joukon energiatarpeet aaltovoima pystyisi parhaimmassa tapauksessa kattamaan. Tässä työssä teknologiaa tarkastellaan hyötysuhteen avulla. Hyötysuhteen halutaan olevan hyvä, jotta mahdollisimman iso osuus syötetystä tehosta muuttuisi tuottavaksi tehoksi. Toisin sanoen halutaan saada häviöiden osuus mahdollisimman pieneksi. Kustannuksien tarkastelu on tärkeää, koska energian myyminen on kaupantekoa. Jonkun pitää olla valmis ostamaan sitä tyydyttävään hintaan. Aaltovoima pyrkii korvaamaan fossiiliset hallitsevat energiantuotantotavat uusiutuvalla energialla, joten sen tulee olla ympäristöystävällinen. Ympäristöystävällisyys on kriteeri, josta ei voida tinkiä uusiutuvien energiantuotantomuotojen tapauksessa.

5.1 Skaalautuvuus

Skaalautuvuutta voidaan tarkastella teoreettisen potentiaalin avulla, johon pyritään yhdistämään mahdollisimman vähän epävarmoja rajoitteita. Teknologia kehittyy nopealla vauhdilla, minkä takia tarkastelu on hyvä tehdä myös ilman tiukkaa rajausta. Monia esimerkkejä löytyy teknologioista, jotka ovat ylittäneet odotukset, kuten puhelimet, internet ja robotiikka. Taulukko 2 kokoaa yhteen aalto-, aurinko- ja tuulivoiman teoreettisen potentiaalin lukuarvot.

Taulukko 2. *Aalto-, aurinko- ja tuulivoiman teoreettisen potentiaalin lukuarvot, muokattu lähteestä (Lewis et al. 2011, s. 504 ; Arvizu et al. 2011, s. 341; Wiser et al. 2011, s. 543).*

Energiantuotantomuoto	Teoreettinen potentiaali (TWh/vuosi)
Aaltovoima	29 500
Aurinkovoima	$1083,3 \times 10^6$
Tuulivoima	1 666 667

Kun puhutaan aaltovoiman teoreettisesta potentiaalista, ei oteta huomioon maantieteellisiä, teknisiä tai ekonomisia rajoitteita. Aaltovoiman teoreettinen potentiaali on arviolta noin 106,2 EJ/vuosi eli 29 500 TWh/vuosi, mikäli jätetään huomioimatta merialueet, joiden tehotiheys on pienempää kuin 5 kW/m. (Lewis et al. 2011, s. 504) Kuvasta 5 löytyy tehotiheyskartta, josta voi katsoa, mistä nämä alle 5 kW/m löytyvät.

On monta tapaa arvioida aurinkovoiman potentiaalia. Tässä työssä aurinkovoiman teoreettisella potentiaalilla arvioidaan säteilyintensiteettiä maanpinnalla, niin maalla kuin merellä. Aurinkovoiman potentiaalilla on tarkemmin ottaen resurssipotentiaali. Se tarkoittaa saatavilla olevaa potentiaalia energiatarkoitukseen. Aurinkovoiman teoreettinen potentiaali on arviolta $3,9 \times 10^6$ EJ/vuosi. (Arvizu et al. 2011, s. 341) Tämä vastaa noin $1083,3 \times 10^6$ TWh/vuosi.

Tuulivoiman teoreettista potentiaalia arvioidaan vuotuisen globaalin virtausarvon avulla. Arvio tuulivoiman teoreettisesta potentiaalista on 6000 EJ/vuosi (Wiser et al. 2011, s. 543). Tämä vastaa noin 1 666 667 TWh/vuosi.

Verrataan aaltovoiman potentiaalia suuruusluokaltaan aurinko- ja tuulivoimaan. Aaltovoiman suhdeluku aurinkovoimaan on pyöristettynä 1:36 723 ja tuulivoimaan 1:56. Tämän perusteella voitaisiin todeta aaltovoiman potentiaalin olevan huomattavasti pienempi näihin kahteen verrattuna.

Kuvan 2 mukaan maapallon polttoaineen kokonaistuotanto vuonna 2016 oli 13 761 Mtoe. Tämä vastaa pyöristettynä 576 EJ tai 160 040 TWh. Jos tämä muutetaan suhdeluvuksi aaltovoiman nähden, saadaan pyöristettynä 1:5. Verrataan aaltovoiman teoreettista potentiaalia vielä vuoden 2016 sähköntuotantoon, jonka arvo oli kuvan 3 mukaan 24 973 TWh. Tässä suhdeluku on noin 1:1. Teoriassa aaltovoimalla olisi mahdollista katkaista koko maapallon sähköntuotanto.

Suomalaisissa kotitalouksissa sähkönkulutuksesta ja kustannuksista keskimäärin 52% menee lämmitykseen, 28% taloussähköön ja 20% lämpimään käyttöveteen. Taloussähkön sisältyy muun muassa kodinkoneiden ja valaistuksen sähkönkäyttö. (Vattenfall) Taulukkoon 3 on laskettu arvio yhden henkilön sähkönkulutuksesta kotitaloudessa. Arvot vaihtelevat rakennustyyppin, -koon ja lämmitystavan mukaan. Tuloksiin vaikuttaa myös, onko kyse yhden asukkaan taloudesta vai jaetaanko kulutus monen henkilön kesken.

Taulukko 3. *Kodin keskimääräinen sähkönkulutus henkilöä kohden, muokattu lähteestä (Vattenfall).*

Talotyyppi (1hlö)	Sähkönkulutus (MWh/vuosi)
Kerrostalo	0,80-1,40
Rivitalo	1,33-1,65
Omakotitalo	1,83-4,62

Kodin keskimääräinen sähkönkulutus henkilöä kohden halutaan tietää, jotta voidaan laskea, kuinka moneen ihmiseen kullakin energiantuotantomuodolla on mahdollista vaikuttaa. Vaikutus saadaan, kun jaetaan kunkin energiantuotantomuodon teoreettinen potentiaali yksittäisen henkilön sähkönkulutuksella. Taulukkoon 4 on koottu kunkin energiantuotantomuodon kattavuus eri rakennustyyppiä kohti. Tulokset on pyöristetty miljardin tarkkuudella ja esitetty muodossa $\times 10^9$.

Taulukko 4. *Energiantuotantomuodon kattavuus eri rakennustyyppiä kohti Suomen keskimääräisellä yksilön sähkönkulutuksella.*

Energiantuotantomuoto	Kerrostalo ($\times 10^9$ hlö)	Rivitalo ($\times 10^9$ hlö)	Omakotitalo ($\times 10^9$ hlö)
Aaltovoima	21-37	18-22	6-16
Tuulivoima	1 190-2 083	1 010-1 253	361-911
Aurinkovoima	773 786-1 354 125	656 545-814 511	234 481-591 967

Keskiarvallisesti tuulivoima on aaltovoimaan nähden 57-kertainen ja aurinkovoima 36 878-kertainen. Tämä vastaa kokoluokaltaan esimerkkiä, missä aaltovoima olisi Andorra, tuulivoima Albania ja aurinkovoima Venäjä. Andorran pinta-ala on 468 km^2 , Albanian $28\,748 \text{ km}^2$, ja Venäjän $17\,125\,402 \text{ km}^2$ (Ekofokus 2015). Kuvassa 17 nämä kolme valtiota on merkitty Euroopan karttaan helpottamaan hahmotusta. Tulee huomioida, että Venäjän valtion rajat eivät näy kuvassa kokonaisuudessaan.



Kuva 17. Andorra, Albania ja Venäjä Euroopan kartalla, muokattu lähteestä (Wikimedia Commons 2011).

Kaiken kaikkiaan taulukon 4 tulokset vaihtelevat 6-1 354 125 miljardin välillä. Maailman väkiluku on arviolta 7,7 miljardia (United Nations 2019, s. 1). Aaltovoima on ainut, joka ei pysty aivan kattamaan koko maailman väkilukua kalleimman omakotitaloesimerkin tapauksessa. Aurinkovoima pystyisi kattamaan sen parhaimmassa tapauksessa yli 175 000 kertaa. Todellisuudessa näitä lukuja ei kuitenkaan pystyittäisi saavuttamaan rajoittavien tekijöiden takia. Vertailukohtana tämä antaa kuitenkin hyvän kuvan kyseisten energiantuotantomuotojen potentiaalista.

5.2 Teknologia

Hyötysuhde antaa kuvan teknologian tehokkuudesta. Hyötysuhde kertoo, kuinka paljon tehdystä työstä saadaan hyötykäyttöön ja mikä on häviöiden osuus. Taulukossa 5 on eritelty arviot tarkasteltavien teknologioiden hyötysuhteista. IPCC tulee sanoista Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Seuraavat tulokset ovat IPCC:n raporteista, joten niitä voidaan pitää vertailukelpoisina.

Taulukko 5. *Aalto-, tuuli ja aurinkovoiman hyötysuhteet, muokattu lähteestä (Lewis et al. 2011, s. 523; Arvizu et al. 2011, s. 381; Wiser et al. 2011, s. 587).*

Energiantuotantomuoto	Hyötysuhde (%)
Aaltovoima	25-40
Tuulivoima	20-50
Aurinkovoima	11-30

Aaltovoiman hyötysuhde taulukossa on teknologiaan pohjautuva arvio (Lewis et al. 2011, s. 523). Tuulivoiman hyötysuhteeseen vaikuttaa paikalliset resurssierot, kuten tuuliolosuhteet sekä turbiiniteknologia (Wiser et al. 2011, s. 587).

Aaltovoiman hyötysuhde on arviolta 25-40 %. Tämä on lähes yhtä suuri kuin tuulivoiman hyötysuhde (20-50 %). Aaltovoiman lukemaa voidaan pitää hyvänä, sillä se on kehityksasteella aikaisemmassa vaiheessa kuin tuulivoima. Aurinkovoiman hyötysuhde 11-30 % on huomattavasti pienempi kuin kahden muun.

Taulukkoon 6 on laskettu niin sanottu todellinen vuositeho. Todellinen vuositeho ollaan saatu kertomalla teoreettisen potentiaalin arvoja hyötysuhdeluvuilla. Tämä on tehty, jotta voidaan saada parempi kuva, kuinka paljon tämän hetkinen teknologia rajoittaa potentiaalia.

Taulukko 6. *Aalto-, aurinko- ja tuulivoiman todelliset vuositehot.*

Energiantuotantomuoto	Todellinen vuositeho (TWh/vuosi)
Aaltovoima	7 375-11 800
Tuulivoima	333 333-833 334
Aurinkovoima	119 163 000-324 990 000

Lasketaan suhdeluvut todellisille vuositehoille. Aaltovoiman suhdeluku tuulivoimaan nähden on 1:28-113. Parhaimmassa tapauksessa suhdeluku puolittuu ja huonoimmassa tapauksessa tuplaantuu, kun verrataan tätä teoreettisen potentiaalin suhdelukuun. Aaltovoiman suhdeluku aurinkovoimaan verrattuna on 1:10 099-44 066. Parhaimmassa tapauksessa suhdeluku on yli 3,5 kertaa pienempi ja huonoimmassa tapauksessa 1,2 kertaa suurempi kuin teoreettisen potentiaalin suhdeluku. Todellinen vuositeho tuo aaltovoiman ja aurinkovoiman välillä lähinnä pelkästään hyötynäkökulmia. Huonoimmassa tapauksessa kerroin on lähestulkoon yksi. Parhaimmassa tapauksessa saavutetaan yli kolminkertainen hyöty.

5.3 Kustannukset

Tässä työssä kustannuksia tarkastellaan tasoitettujen kustannuksien avulla. Jotta saada tietää tasoitettut kustannukset, tulee ensiksi laskea hankintakustannukset. WEC:n hankintakustannukset saadaan määritettyä kaavalla

$$C_{hankinta} = N * C_{WEC} + L_{offshore} * C_{offkaapeli} + L_{onshore} * C_{onkaapeli} + C_{säh.jak.kes.} + C_{säh.ase.} + C_{kiinnitys}, \quad (6)$$

jossa N on hankittavien muuntajien määrä, C_{WEC} on yksittäisen muuntajan sekä sen asennuksen hinta, $L_{offshore}$ on vedenalaisen kaapelin pituus, $C_{offkaapeli}$ on vedenalaisen kaapelin hinta per pituusyksikkö, $L_{onshore}$ on maanalaisen kaapelin pituus olemassa olevaan sähköverkkostoon asti, $C_{onkaapeli}$ on maanalaisen kaapelin hinta per pituusyksikkö, $C_{säh.jak.kes.}$ on sähköjakelukeskuksen hinta, $C_{säh.ase.}$ on sähköasennuksen hinta ja $C_{kiinnitys}$ on kiinnitysjärjestelmän sekä sen asennuksen hinta. Muokattu lähteestä (Astariz et al. 2015, s. 399)

Tasoitettut kustannukset kertovat elinkaarikustannukset suhteessa odotettuun tuottoon. Arvot on muutettu nykyarvoa vastaaviksi. Kaava, jolla tasoitettut kustannukset on laskettu tässä työssä, on

$$TK = \frac{P_{val}(kustannukset)}{P_{val}(tuotto)} = \frac{\sum_{t=0}^n C_t / (1+r)^T}{\sum_{t=0}^n O_t / (1+r)^T}, \quad (7)$$

jossa P_{val} on diskonttaus nykyaikaan, joka toteutetaan kaavalla $\sum_{i=0}^n x_i / (1+r)^i$. Kaavassa C_t on tulevaisuuden kustannukset, O_t on tulevaisuuden tuotto ja r on diskonttausarvo. Astariz et al. mukaan merienergian diskonttausarvo on 5-15 %. Muokattu lähteestä (Astariz et al. 2015, s. 402) Kustannuksiin voidaan lukea mukaan investointikustannukset, operointikustannukset, huoltokustannukset, polttoainekustannukset, seisokkituoton kustannukset sekä hiilidioksidipäästöjen kustannukset. (Neill et al. 2018, s. 19)

Suurin osa WEC:n kustannuksista muodostuu esikäyttö-, rakennus-, toiminta- ja purkukustannuksista (Astariz et al. 2015, s. 399). Taulukkoon 7 on eritelty WEC:n kustannuskategorioita. Jokaisen kategorian kustannukset on arvioitu toiseen sarakkeeseen.

Taulukko 7. WEC:n kustannuserittely, muokattu lähteestä (Astariz et al. 2015, s. 399-401).

Kategoria	Kustannukset
Esikäyttökustannus	10 % pääomamenoista arviolta 500 000 - 2 000 000 €
Lisenssi- ja lupakustannukset	3,7 % asennetusta tehosta / W
Laitteisto- ja asennuskustannukset	2,5 – 6 M€ / MW
Kiinnitysjärjestelmäkustannukset	10 % pääomamenoista
Kiinnitysjärjestelmän asennuskustannukset	50 000 € / päivä
Vedenalaisen kaapelin kustannukset	10 % pääomamenoista
Kaapelin asennuskustannukset	2,07 € / m
Sähköaseman kustannukset	noin 1,2 M€
Käyttö- ja huoltokustannukset	1,5 – 5 % pääomamenoista
Tarkistus- ja seisokkikustannukset	10 % pääomamenoista
Varaosakustannukset	90 % pääomamenoista
Julkisten palveluiden kustannukset	3,5 € / MWh
Vuokrakustannukset	2,5 % pääomamenoista
Vakuutuskustannukset	0,8-2 % pääomamenoista

Taulukon 7 esikäyttökustannukset muodostuvat muun muassa tutkimuksesta aiheutuvista kustannuksista sekä lupakäsittelykustannuksista. Näiden kustannusten arvioiminen on haastavaa sillä siihen vaikuttavat yksilöllisesti projektin ominaisuudet sekä sen sijainti. WEC:n kustannukset muodostuvat laite- sekä asennuskustannuksista. Kiinnitys-järjestelmässä vaihtelevat sen toimintaperiaate, materiaali ja kiinnitystyyppi. Kaapelointi- ja sähköasennuskustannuksiin vaikuttaa, minkä tyyppinen tehon ulostulo on kyseessä – tasa- vai vaihtovirta. Kustannuksiin vaikuttaa myös järjestelmän etäisyys rannasta sekä aaltofarmin laitteistojen keskinäinen etäisyys toisistaan. Viimeisenä pitää huomioida kaapelin sopivuus sekä sen käyttö kuivalla maalla. Sähköasema yhdistää järjestelmän sähköverkkoon. Käyttö- ja huoltokustannuksia arvioidaan öljy ja kaasua sekä offshore tuuli-voiman käyttökokemuksien avulla. Arvioidaan, että 10 vuoden jälkeen asennuksesta WEC-järjestelmä tulee kuljettaa pois mereltä kokonaisvaltaiseen huoltoon. Oletetaan myös, että järjestelmä tulee purkaa 20 vuoden käytön jälkeen.

Taulukkoon 8 on koottu tasoitettujen kustannusten numeeriset arvot. Tasoitetut kustannukset on esitetty onshore ja offshore aalto- ja tuulivoiman sekä PV-aurinkovoiman osalta.

Taulukko 8. *Onshore ja offshore aalto- ja tuulivoiman sekä PV-aurinkovoiman tasoitetut kustannukset, muokattu lähteestä (Astariz et al. 2015, s. 402; Branker et al. 2011, s. 4472-4474).*

Energiantuotantomuoto	Tasoitetut kustannukset (€/MWh)
On/nearshore aaltovoima	90 - 140
OffShore aaltovoima	180 - 490
Onshore tuulivoima	67,68
Offshore tuulivoima	101,43
PV-aurinkovoima	90,2 - 775,72

Jos verrataan aaltovoiman tasoitettuja kustannuksia tuulivoimaan, saadaan suhdeluku 1:1-7. Aaltovoiman ja PV-aurinkovoiman väliseksi suhdeluvuksi saadaan 1-9:1-5. Yhteenvetona tasoitetut kustannukset voivat olla aaltovoimaan nähden yhtä suuret, yhdeksän kertaa halvemmat tai seitsemät kertaa kalliimmat. Toisin sanoen skaala, jolle tasoitetut kustannukset jakautuvat on erittäin laaja. Kustannuksia tarkasteltaessa tulee huomioida, miltä vuodelta lukuarvo on.

Fortumin tarjoama nykyinen yleissähkön hinta on 5,34 snt/kWh. Sopimus tarjoaa muuttumattoman sähkön hinnan kahdeksi vuodeksi. (Fortum) Vattenfallin fossiilivapaan sähkön nykyinen hinta on 5,85 snt/kWh. Tässäkin hinta on taattu muuttumattomana kahdeksi vuodeksi. (Vattenfall) Ilman 24 % arvonlisäveroa Fortumin tarjoaman yleissähkön hinnaksi saadaan 4,06 snt/kWh ja Vattenfallin fossiilivapaan sähkön hinnaksi 4,45 snt/kWh. Käytetään seuraavassa vertailussa Fortumin tarjoamaa arvonlisäverotonta sähkön hintaa muodossa 40,6 €/MWh.

Eri asumismuotojen vuosittaiset sähkökustannukset saadaan laskettua kertomalla taulukon 8 tasoitetut kustannukset taulukon 3 yksittäisen henkilön vuosittaisella sähkönkulutuksella. Verrataan näitä tuloksia Fortumin tarjoamaan arvonlisäverottomaan sähkön hintaan. Tämä tehdään kertomalla myös Fortumin tarjoama arvonlisäveroton sähkön hinta taulukon 3 yksittäisen henkilön vuosittaisella sähkönkulutuksella. Tulokset löytyvät taulukosta 9.

Taulukko 9. *Fortumin, onshore ja offshore aalto- ja tuulivoiman sekä PV-aurinkovoiman vuosittaiset sähkökustannukset.*

Energiantuotantomuoto	Kerrostalo (€/vuosi)	Rivitalo (€/vuosi)	Omakotitalo (€/vuosi)
On/nearshore aaltovoima	72 - 196	120 - 231	165 - 647
Offshore aaltovoima	144 - 686	239 - 809	329 - 2 264
Onshore tuulivoima	54 - 95	90 - 112	124 - 313
Offshore tuulivoima	81 - 142	135 - 167	186 - 469
PV-aurinkovoima	72 - 1 086	120 - 1 280	165 - 3 584
Fortumin arvonlisäveroton sähkön hinta	32 - 57	54 - 67	74 - 188

Taulukon 9 vuosittaiset energiakustannukset vaihtelevat 32-3 584 euron välillä. Aaltovoiman tulokset ovat 72-647 euroa. Fortumin arvonlisäverottomaan sähkön hintaan verrattuna on/nearshore aaltovoiman kustannukset ovat parhaimmassa tapauksessa lähes saman suuruiset ja huonoimmassa tapauksessa noin kolminkertaiset. Myös muiden energiantuotantomuotojen kustannukset vaihtelevat suuresti. Ainoastaan onshore tuulivoima on lähes samoissa lukemissa Fortumin arvonlisäverottoman sähkön hinnan kanssa.

5.4 Ympäristö

On olemassa monia syitä, miksi ympäristöystävällisiä energiantuotantomuotoja tarvitaan. Ne vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä eli GHG-päästöjä. Ilman ja veden saasteet vähenisivät niiden käytön seurauksena. Veden käyttö ja maan rappioitumisen vähenisi. Saasteiden aiheuttamien hengitystie- ja syöpäsairauksien määrä laskisi. Lopputomina energiantuotantomuotoina energian riittävyys olisi taattu. Energiantuotannon hinta alenisi, sillä ainoat kustannukset olisivat huolto- ja investointikustannukset. Valtiot olisivat energialtaan omavaraisempia. Työpaikkoja tarvittaisiin enemmän per tuotettu energiayksikkö. Ydinvoimaan liittyvät riskit saataisiin minimoitua. (Diesendorf et al. 2018, s. 319)

Taulukkoon 10 on koottu tarkasteltavien energiantuotantomuotojen GHG-päästöt. GHG-luku kertoo hiilidioksidin määrän grammoissa tuotettua kilowattituntia kohti.

Taulukko 10. *Aalto-, tuuli-, ja aurinkovoiman kasvihuonekaasupäästöt (Lewis et al. 2011, s. 518; Arvizu et al. 2011, s. 371; Wiser et al. 2011, s. 571).*

Energiantuotantomuoto	GHG ($g\ CO_2eq/kWh$)
Aaltovoima	8
Tuulivoima	12
Aurinkovoima	45

Aaltovoiman varsinainen energiantuotantoprosessi ei tuota kasvihuonekaasuja. Kun pohditaan aaltovoiman päästöjä, tarkoitetaan valmistuksesta, raaka-aineista ja ylläpidosta aiheutuvista päästöistä. Aaltovoiman keskimääräiset elinkaaripäästöt ovat arviolta $8\ g\ CO_2eq/kWh$. (Lewis et al. 2011, s. 517-518) Niin kuin ei aaltovoima ei myöskään tuulivoima tuota itsessään GHG-päästöjä. Päästöt aiheutuvat energiantuoton ulkopuolisista prosesseista kuten lueteltu aikaisemmin. Tuulivoiman keskiarvoiset elinkaaripäästöt ovat arviolta $12\ g\ CO_2eq/kWh$. (Wiser et al. 2011, s. 570-571) Kuten kahdessa aikaisemmassa, myös aurinkovoima päästöt aiheutuvat energiantuotantoprosessin ulkopuolelta. Aurinkovoiman elinkaaripäästöt ovat arviolta $45\ g\ CO_2eq/kWh$ (Arvizu et al. 2011, s. 369-371). Aaltovoimalla on tämän mukaan näistä kolmesta pienimmät GHG-päästöt.

Tutkimuksia aaltovoiman ympäristöhaitoista on tehty vähän. Mahdollisia aaltovoiman aiheuttamia ympäristöhaittoja ovat muun muassa pintakapasiteetin käyttö, vaikutukset eliöstöön ja ihmisiin sekä veden puhtauteen liittyvät ongelmat. Veden puhtauteen liittyvät ongelmat voivat johtua laitteiston mahdollisista kemikaali- tai öljyvuodoista. Energiantuotantoprosessi vaikuttaa aaltojen kokoon, mitä voidaan pitää myös ympäristöhaittana. (Lewis et al. 2011, s. 518-519) Tuulivoimaan kuuluvia ympäristöhaittoja ovat muun muassa näkösaasteet, lintujen ja lepakoiden kuolemat, ihmisiin ja ekosysteemiin vaikuttavat tekijät sekä ilmasto-olosuhteiden muutokset. Ihmisiin ja ekosysteemeihin vaikuttavat tekijät johtuvat maan käytöstä. Ilmasto-olosuhteet saattavat muuttua, koska tuulimyllyt vaihtelevat tuulen voimakkuutta. (Wiser et al. 2011, s. 572-575) Kuten kahdessa edellisessä myös aurinkovoiman ympäristöhaittoihin kuuluu maan käyttö. Kun maaperä vuorataan aurinkopaneeleilla, maan käytöstä seuraa myös näkösaaste. (Arvizu et al. 2011, s. 372)

6. TULOSTEN TARKASTELU

Teoreettisen skaalautuvuuden näkökulmasta aaltovoima jää suhteessa aurinko- ja tuulivoimaan sekä polttoaineen kokonaistuotantoon. Teoriassa aaltovoiman skaalautuvuuden riittäisi kattamaan jopa koko maapallon sähköntuotannon. Aaltovoimalla pystyttäisiin myös teoriassa kattamaan miljardien kotitalouksien sähkönkulutus. Kysymys on, mihin tarkoitukseen aaltovoimaa halutaan käyttää. Jos sen halutaan saavuttavan yksinomainen asema energiamarkkinoilla, sen skaalautuvuus ja teoreettinen potentiaali jää liian pieneksi. Tällaisessa tapauksessa aaltovoimaa ei olisi järkevää lähteä kehittämään eteenpäin. Jos se halutaan osaksi jotakin energiantuotannon osa-aluetta, aaltovoiman hyöty teoreettisen skaalautuvuuden näkökulmasta voidaan perustella. Pitää kuitenkin huomioida näiden olevan vain teoreettisia lukuarvoja. Todellisuudessa mukaan tulee rajoittavat tekijät, kuten sallitut ja kannattavat sijoituspaikat sekä teknologiset rajoitteet.

Hyötysuhteen perusteella aaltovoima vaikuttaa erittäin kilpailukykyiseltä aurinko- ja tuulivoimaan verrattuna. Aaltovoiman hyötysuhde on lähes yhtä suuri kuin tuulivoiman ja huomattavasti parempi kuin aurinkovoimalla. Aivan kuten skaalautuvuuden tapauksessa myös hyötysuhteen tapauksessa tulee muistaa, että työssä käytetyt lukuarvot ovat monissa tapauksessa arvioita. Nämä ovat suuntaa-antavia tuloksia ja todellisuudessa ne saattavat erota kyseisistä arvioista.

Teorialuvussa 3.2 mainittiin ideaalin sijoitusvyöhykkeen olevan 30-60 m. Alle 200m syvät merialueet kattavat noin 7 % meren pinta-alasta (Woods Hole Oceanographic Institution). Mikäli tämä otetaan huomioon teoreettisessa potentiaalissa rajoittavana tekijänä, saadaan skaalautuvuuden uudeksi arvoksi 2 065 TWh/vuosi. Skaalautuvuutta voidaan rajoittaa lisää ottamalla huomioon teknologiset rajoitteet hyötysuhteen avulla. Tämä huomioituna aaltovoiman skaalautuvuus pienenee arvoon 516 - 826 TWh/vuosi. Uusi kahdesti rajoitettu skaalautuvuuden arvo vastaa 2- 3 % maailman sähkönkulutuksesta. Kotitalouksien sähkönkulutus uudella skaalautuvuuden arvolla henkilöä kohden voitaisiin kattaa taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. *Aaltovoiman kattavuus kahdesti rajoitetun skaalautuvuuden arvon avulla.*

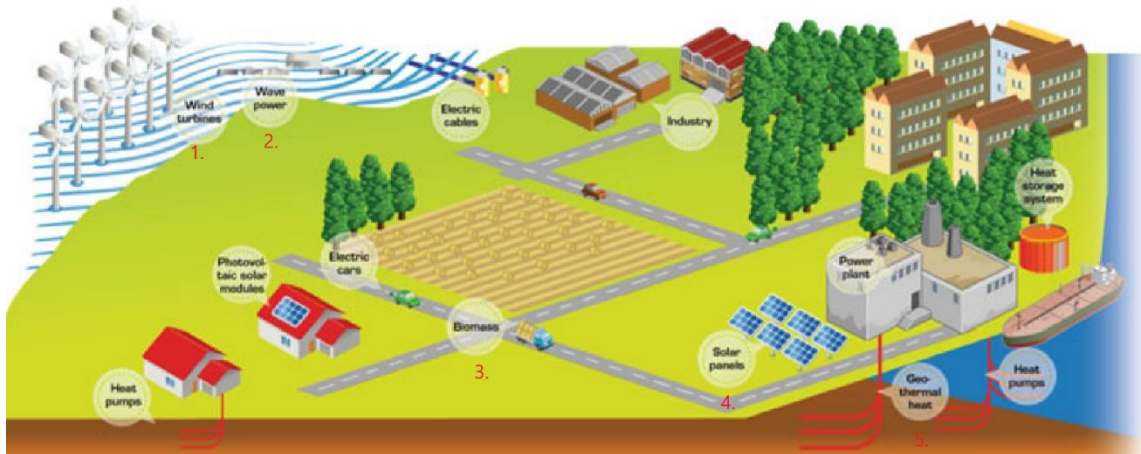
Energiantuotantomuoto	Kerrostalo ($\times 10^9$ hlö)	Rivitalo ($\times 10^9$ hlö)	Omakotitalo ($\times 10^9$ hlö)
Aaltovoima	0,4-1,0	0,3-0,6	0,1-0,2

Taulukon 11 luvut ovat henkilömääriä ja ne on esitetty muodossa $\times 10^9$. Taulukon 11 luvut pienenevät 98 % aiemmista taulukon 4 lukemista. Vaikka uudet rajoitetun skaalautuvuuden arvot ovat huomattavasti pienempiä kuin rajoittamattomat, pystyttäisiin tässäkin tapauksessa tuottamaan miljardeille ihmisille sähköä ympäri maailmaa. Voidaan palata takaisin kysymykseen, halutaanko aaltovoima vallitsevaksi vai tukevaksi energiantuotantomuodoksi. Huomion arvoista on, että esimerkissä käytetty 7 % rajaa aaltovoiman skaalaa lähemmäs todellisuutta. WEC-järjestelmien ideaali sijoitusvyvyys ei kuitenkaan ollut alle 200 m vaan 30-60 m. Voidaan olettaa 30-60 m vastaavan pienempää prosentuaalista osuutta kuin alle 200m syvät merialueet. Todellisuudessa rajoittava prosenttiosuus olisi vieläkin pienempi kuin 7 prosenttia.

GHG-päästöjen perusteella aaltovoima vaikuttaa ympäristöystävällisemmältä energiantuotantomuodolta kuin aurinko- tai tuulivoima. Se on iso valttikortti ilmastoarvojen merkityksen korostuessa. Tuloksiin on suhtauduttava kuitenkin kriittisesti. Aaltovoima on teknologioista tuorein ja vähiten tutkittu. Tästä syystä voi olla, että sen ympäristövaikutuksia ei tiedetä yhtä hyvin kuin tuuli- ja aurinkovoiman. GHG-luku voi tulevaisuudessa heilahda suuntaan tai toiseen. Suuntaa antavana tuloksena aaltovoiman GHG-lukuarvo vaikuttaa lupaavalta.

Aaltovoiman tasoitetut kustannukset kilpailevat parhaimmassa tapauksessa samassa suuruusluokassa aurinko- ja tuulivoiman sekä tämän hetkisen Fortumin arvonlisäverottoman sähkön hinnan kanssa. Varsinkin on/nearshore aaltovoiman kustannukset vaikuttavat vertailukelpoisilta. Jos tarkastellaan kerrostalon sähkönkulutusta, on/nearshore aaltovoiman ja tämän hetkisen Fortumin arvonlisäverottoman sähkön hinnan tapauksessa, ero on huonoimmassa tapauksessa 164 €/vuosi. Tämä tarkoittaa, että on/nearshore aaltovoimalla tuotettu energia on kuukaudessa 13,7 € kalliimpaa kuin Fortumin arvonlisäveroton sähkön hinta Suomessa. Päivätasolla tämä vastaa 0,4 € per päivä. Ympäristöystävällisyys vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin enenevissä määrin. Vaikka aaltovoimalla tuotettu energia voi olla joissain tapauksissa kalliimpaa, ei ero ole liian suuri, etteikö sitä voitaisi perustella ympäristöhyödyillä. Aaltovoima on kehitysvaiheeltaan vielä aikaisessa vaiheessa. Tämä saattaa vaikuttaa korkeampiin kustannuksiin ja tulevaisuudessa kustannukset saattavat pienentyä.

Yhteenvedona aaltovoiman potentiaalista voidaan todeta, että se ei tule vallitsevana kattamaan koko maapallon energian kulutusta. Sen on kuitenkin mahdollista kattaa merkittävä osa energiankulutuksesta. Aaltovoimasta aiheutuvat kustannukset ovat kilpailukykyiset ja ilmastohyöty GHG-päästöjen näkökulmasta merkittävä. Tulevaisuus aaltovoiman osalta voisi näyttää kuva 18 mukaiselta.



Kuva 18. Fossiilivapaa tulevaisuuden hahmotelma, muokattu lähteestä (Kofoed et al. 2017, s. 19).

Kuva 18 on hahmotelma energiantuotannosta ilman fossiilisia polttoaineita. Kuvasta löytyy viisi numeroitua energian lähdettä:

1. Tuulivoima
2. Aaltovoima
3. Biomassa
4. Aurinkovoima
5. Geoterminen energiantuotanto

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen käytöstä seuraa niin ilmastollisia kuin taloudellisia hyötyjä. Uusiutuva energiantuotanto ei itsessään aiheuta kustannuksia. Ainoat siitä aiheutuvat kustannukset muodostuvat järjestelmän materiaalista, rakentamisesta sekä ylläpidosta. Uusiutuvien energiantuotantomuotojen käyttö antaa valtioille mahdollisuuden itsenäisempään energiantuotantoon. Tämä lisää työpaikkoja paikallisesti, mikä parantaa paikallista taloutta. (Kofoed et al. 2017, s. 19)

7. YHTEENVETO

Energiantuotannon ja -kulutuksen kasvaessa uusiutuvan energiantuotantomuodot ovat pystyneet säilyttämään ja jopa saavuttamaan suuremman osuuden energiamarkkinoista kuluneessa 50 vuodessa. Tästä voidaan päteellään uusiutuvien energiantuotantomuotojen kehityksen olevan menossa oikeaan suuntaan. Näihin uusiutuviin energiantuotantomuotoihin luetaan mukaan aaltovoima, jota tarkastellaan tässä työssä. Vaikka aaltovoiman voidaan katsoa olevan vielä kehitysvaiheessa, löytyy siitä laitoksia ja prototyyppejä ympäri maailmaa. Espanjan Mutrikussa sijaitsee OWC-järjestelmä, jonka kokonaiskapasiteetti on 300 kW. Skotlannissa sijaitsee Oyster 800 -niminen WAB-järjestelmä, jonka kokonaiskapasiteetti on 800 kW. (Kofoed et al. 2017, s. 22-37) Tanskassa sijaitsee Wave Dragon niminen prototyyppi, jonka kokonaiskapasiteetti on 7 MW (Wave Dragon 2009).

Tässä työssä markkinapotentiaalia on tutkittu skaalautuvuuden, teknologian, kustannusten sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta. Skaalautuvuuden kaksi suurinta tekijää on maantieteellinen sijainti sekä aalto-olosuhteet. Hyviä maantieteellisiä sijainteja ovat muun muassa Australia, Uusi-Seelanti, Etelä-Afrikka, Chile, Argentiina, Uruguay, Etelä-Brasilia, Amerikan länsi- ja itärannikko sekä Eurooppa (Kofoed et al. 2017, s. 13). Skaalautuvuutta rajoittaa muun muassa teknologinen hyötysuhde sekä optimaalinen sijoitusvyvyys. Kun nämä kaksi huomioidaan, voidaan arvioida, että aaltovoimalla olisi mahdollista kattaa noin miljardin kotitalouden sähkönkulutus. Luku on merkittävä jopa koko maapallon väestöön suhteutettuna.

Aaltovoiman kustannukset ovat 0,4 € kalliimmat per päivä kuin tämänhetkinen sähkön hinta Suomessa. Yksilön tasolla puhutaan keinoista, joita voidaan toteuttaa ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi. Tällaisia keinoja on muun muassa kierrätys ja kasvisruokavalio. Aaltovoiman GHG-päästöt ovat erittäin pienet jopa verrattuna tuuli- ja aurinkovoimaan. Vaikka aaltovoiman kustannukset voisivat olla sähkön hintavertailussa suuremmat, etsitään yksilötasolla koko ajan uusia tapoja, joilla voi vaikuttaa ilmastonmuutoksen torjunnassa. Tämä on yksi keino ja sen hinta on 40 senttiä per päivä. Voidaan myös olettaa aaltovoiman kustannusten laskevan, mitä enemmän sen teknologiaa valjastetaan ja kehitetään.

Koska maailman väkiluku on arviolta 7,7 miljardia (United Nations 2019, s. 1), ei aaltovoima pysty kattamaan koko maailman sähkönkulutusta yksin. Ei ole kuitenkaan pakollista etsiä yksittäistä energiantuotantomuotoa kattamaan koko maailman kulutusta. Voidaan etsiä monia eri tuotantomuotoja, joiden käyttö tukee toisiaan ja soveltuu yhteen.

Kestävänä ratkaisuna näiden tulisi lisäksi olla mahdollisimman vähäpäästöisiä. Yhdessä esimerkiksi aalto-, aurinko- ja tuulivoiman sekä biomassan ja geotermisen energiantuotannon avulla voitaisiin toteuttaa fossiilivapaa maailmankuva. Tulevaisuuden tarve ja kestävyysden takaaminen vaatii muutoksia. Onneksi moniin näihin muutosskenaarioihin on olemassa jo teknologia ja tietämys. Se vaatii enää toteuttamista suuremmissa mittakaavassa.

LÄHTEET

- Arvizu, D., P. Balaya, L. Cabeza, T. Hollands, A. Jäger-Waldau, M. Kondo, C. Konseibo, V. Meleshko, W. Stein, Y. Tamaura, H. Xu, R. Zilles, (2011): Direct Solar Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Direct Solar Energy. IPCC. 341 s. 369-372 s. 381 s. Saatavilla (viitattu 16.10.2019): <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>
- Astariz, S. Iglesias, G. (2015). The economics of wave energy: A review. Elsevier Ltd. 399-402 s.
- Barater, D. Cova, P. Delmonte, N. Giampaolo, B. Giuliani, F. (2016). Review of Oscillating Water Column Converters. IEEE. 1699-1702 s.
- Bevilacqua, G. Zanuttigh, B. (2011). Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development. Università di Bologna. 11-12 s.
- Boake, C. Folley, M. Whittaker, T. (2002). Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant. The International Society of Offshore and Polar Engineers. 586 s.
- Branker, K. Pathak, M.J.M. Pearce, J.M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Elsevier Ltd. 4 472-4 474 s.
- Cruz, J. (2008). Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 45 s.
- Curran, R. Folley, M. Whittaker, T. (2005). Comparison of LIMPET contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions. Elsevier Ltd. 1 056 s.
- Diesendorf, M. Elliston, B. (2018). The feasibility of 100% renewable electricity systems: A response to critics. Elsevier Ltd. 318-319 s.

European Marine Energy Centre (EMEC). Pelamis Wave Power. Saatavilla (viitattu 4.11.2019): <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>

Ekanayake, J. Jenkins, N. (2017). Renewable Energy Engineering. Cambridge University Press. 254-256 s. 260 s. 267-270 s.

Ekofokus. (2015) Maat, väestö ja maiden pinta-alat. Saatavilla (viitattu 2.1.2020): <https://www.ekofokus.com/2015/03/maat-vaesto-ja-maiden-pinta-alat.html>

Esnaola, G. Garcia-Soto, G. Ibarra-Berastegi, G. Serras, P. Sáenz, J. Ulazia, A. (2018). Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016). Elsevier Ltd. 20 s.

Falcão, A.F.O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. Elsevier Ltd. 900 s.

Fortum. Fortum Takuu – 24 kk sopimus. Saatavilla (viitattu 23.12.2019): <https://www.fortum.fi/kotiasiakkaille/sahkoa-kotiin/sahkosopimukset/takuu>

Frigaard, P. Margheritini, L. Vicinanza, D. (2008). SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. Elsevier Ltd. 1 371-1 374 s.

Heras-Saizarbitoria, I. Laskurain, I. Zamanillo, I. (2013). Social acceptance of ocean wave energy: A case study of an OWC shoreline plant. Elsevier Ltd. 519 s.

International Energy Agency (IEA). (2018). Key World Energy Statistics (KWES). 2 s. 14 s. 37 s. Saatavissa (viitattu 20.3.2019): <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2018>

International Energy Agency (IEA). (2010). The Impact of the Financial and Economic Crisis on Global Energy Investment. 3 s. Saatavilla (viitattu 13.9.2019): <https://websites.iea.org/the-impact-of-the-financial-and-economic-crisis-on-global-energy-investment>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2014). Wave Energy: Technology brief. 5 s. 12-13 s.

IPCC. About the IPCC. Saatavilla (viitattu 29.1.2020): <https://www.ipcc.ch/about/>

Janssen, P. 2007. Progress in ocean wave forecasting. Elsevier Ltd. 3572-3575s.

Juricke, S. MacLeod, D. Palmer, T. Weisheimer, A. Zanna, L. 2018. Seasonal to annual ocean forecasting skill and the role of model and observational uncertainty. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1 947-1 949 s.

Kofoed, J. Pecher, A. (2017). Handbook of Ocean Wave Energy. Springer open. 1 s. 13 s. 19 s. 22-37 s. 43-47 s.

Lewis, A., S. Estefen, J. Huckerby, W. Musial, T. Pontes, J. Torres-Martinez, (2011): Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Ocean Energy. IPCC. 504 s. 517-519 s. 523 s. Saatavilla (viitattu 16.10.2019): <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>

Miller, C. (2004). A Brief History of Wave and Tidal Energy Experiments in San Francisco and Santa Cruz. OutsideLand.org. Saatavilla (viitattu 14.2.2019): <http://www.outside-lands.org/wave-tidal.php>

Neill, S. Hashemi, M. (2018). Fundamentals of Ocean Renewable Energy - Generating Electricity from the Sea. Elsevier Ltd. 19 s.

Nelson, V. (2011). Introduction to renewable energy. CRC Press. 262-264 s.

Ocean Power Technologies (OPT). Products: PB3. Saatavilla (viitattu 11.11.2019): <https://www.oceanpowertechnologies.com/product>

United Nations. Oceans and the Law of the Sea. Saatavilla (viitattu 29.10.2019): <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/oceans-and-law-sea/index.html>

United Nations. (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. Department of Economic and Social Affairs. 1 s.

Vattenfall. Kodin sähkökulutus. Saatavilla (viitattu 21.10.2019): <https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/>

Wave Dragon. (2009). Prototype testing in Denmark. Saatavissa (viitattu 9.6.2019): <http://www.wavedragon.co.uk/2009/03/15/prototype-testing-in-denmark/>

Wave Dragon. Home. Saatavissa (viitattu 28.10.2019): <http://www.wavedragon.net/>

Wikimedia Commons. File:Andorra in Europé (zoomed).svg. (2011) Saatavilla (viitattu 2.1.2020): [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Andorra_in_Europe_\(zoomed\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Andorra_in_Europe_(zoomed).svg)

Wiser, R., Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P. H. Jensen, V. Nikolaev, M. O'Malley, G. Sinden, A. Zervos, (2011): Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Wind Energy. IPCC. 543 s. 570-575

s. 587 s. Saatavilla (viitattu 16.10.2019): <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>

Woods Hole Oceanographic Institution. Know Your Ocean. Saatavilla (viitattu 16.1.2020): <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/>